



Universidad Tecnológica
de Pereira

Facultad de
Ingeniería Mecánica

Soldadura y su Inspección



José Luddey Marulanda Arévalo

Colección Textos Académicos



JOSÉ LUDDEY MARULANDA ARÉVALO, (Bucaramanga, Santander, Colombia,1975). Doctor en Química avanzada de la Universidad Complutense de Madrid e Ingeniero Metalúrgico de la Universidad Industrial de Santander.

Profesor Titular de la facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira.

Autor de los libros: *Fundamentos de la corrosión* (2006), *Fundamentos en la soldadura de los metales* (2007), *Inspección de soldaduras* (2014) y *Rociado térmico* (2015).

Ha publicado artículos en revistas especializadas nacionales y extranjeras.

Pertenece al Grupo de Investigación en Materiales Avanzados (GIMAV).

jlmarulanda@utp.edu.co

SOLDADURA Y SU INSPECCIÓN

José Luddey Marulanda Arévalo



Colección Textos Académicos
Facultad de Ingeniería Mecánica

2018

Marulanda Arévalo, José Luddey
Soldadura y su inspección / José Luddey Marulanda Arévalo. Pereira : Universidad
Tecnológica de Pereira, 2018.

544 páginas. – (Colección Textos Académicos)

ISBN:978-958-722-332-3

1. Procesos de soldadura 2. Materiales en ingeniería 3. Soldadura – Tratamiento
térmico 4. Procesos de manufactura 5. Ciencia de los materiales.

CDD 671.52

Soldadura y su Inspección

© José Luddey Marulanda Arévalo

© Universidad Tecnológica de Pereira

Primera Edición, 2018

ISBN: 978-958-722-332-3

Universidad Tecnológica de Pereira

Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión

Editorial Universidad Tecnológica de Pereira

Coordinador editorial UTP

Luis Miguel Vargas Valencia

luismvargas@utp.edu.co

Tel:3137381

Edificio 9, Biblioteca Central “Jorge Roa Martínez”

Cra. 27 No. 10-02 - Los Álamos

Pereira, Colombia

www.utp.edu.co

Montaje y producción:

Universidad Tecnológica de Pereira

Centro Recursos Informáticos y Educativos, CRIE

Reservados todos los derechos

CONTENIDO

Prólogo	13
1. INTRODUCCIÓN.	16
1.1. Sistemas de gestión en soldaduras.	19
1.2. Los estándares o normas en soldaduras.	23
1.3. Costo en la calidad de soldaduras.	25
1.4. Costos en las operaciones de soldadura.	28
1.4.1. La estimación de costos.	31
1.4.2. Indicadores de productividad en la soldadura.	36
1.4.3. Cálculo de los costos de soldadura.	40
1.4.3.1. Cálculo de consumo de material de aporte.	28
2. GENERALIDADES DE MATERIALES DE INGENIERÍA.	45
2.1. Clasificación de los materiales.	46
2.1.1. Materiales metálicos.	48
2.1.2. Materiales cerámicos.	49
2.1.3. Materiales poliméricos.	50
2.1.4. Materiales compuestos.	53
2.2. Estructura atómica de los materiales.	55
2.2.1. Enlaces químicos.	55
2.3. Estructura de los sólidos cristalinos (organización atómica).	60
2.3.1. Celdas unitarias.	62
2.3.2. Principales estructuras cristalinas metálicas.	64
2.4. Solidificación de los metales.	68
2.4.1. Sólidos amorfos.	70
2.4.2. Defectos en estructuras cristalinas.	71
2.5. Aleaciones.	73
2.6. Diagramas de fases Hierro-Carbono.	74
2.6.1. Alotropía o polimorfismo del hierro.	76
2.7. Tratamientos térmicos.	77
2.7.1 Temple.	78
2.7.2 Recocido.	80
2.7.3. Revenido.	83
2.7.4. Normalizado.	83
2.7.5. Tratamientos termoquímicos.	84
2.7.6. Diagramas TTT (Tiempo-temperatura-transformación).	87
2.8. Aceros.	88
2.8.1. Acero al carbono.	89
2.8.2. Aceros de baja aleación.	89
2.8.3. Aceros de media aleación.	90
2.8.4. Acero de alta aleación.	91
2.8.4.1. Aceros inoxidables.	92
2.8.4.2. Aceros para herramientas.	98
2.9. Aceros de construcción mecánica.	98

3. DISEÑO DE JUNTAS Y SÍMBOLOS DE SOLDADURA.	102
3.1. Diseño de juntas.	102
3.2. Partes de la junta soldada.	103
3.2.1. Tipos de soldaduras.	104
3.3. Posiciones de soldadura	115
3.4. Símbolos de soldadura.	116
3.4.1. Aplicaciones de los símbolos de soldadura.	124
3.4.2. Dimensiones de la soldadura de filete.	125
3.4.3. Soldaduras tapón.	127
3.4.4. Símbolos de pruebas no destructivas.	130
4. PROCESOS DE SOLDADURA.	132
4.1. Soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW).	136
4.1.1. Generación del arco en el electrodo recubierto.	144
4.1.2. Fuentes de potencia.	147
4.2. Soldadura por arco con electrodo metálico y gas de protección (GMAW).	150
4.2.1. Equipo de soldadura para el proceso GMAW.	156
4.2.2. Pistola o antorcha de soldadura.	157
4.2.3. Alambre del electrodo.	160
4.2.4. Control de discontinuidades.	160
4.2.5. Importancia de la fluidez.	161
4.2.6. Influencia del gas y el arco de la soldadura.	165
4.3. Soldadura por arco con varilla tubular (FCAW).	166
4.3.1. Fuentes de potencia.	170
4.4 Soldadura por arco con electrodo de tungsteno y gas de protección (GTAW).	171
4.4.1. Fuente de potencia y accesorios.	162
4.4.2. Electrodo.	164
4.4.3. Gases de protección.	179
4.4.4. Metal de aporte.	180
4.5. Soldadura por arco sumergido (SAW).	180
4.5.1. Fuente de potencia.	183
4.6. Soldadura oxiacetilénica (OAW).	184
4.6.1. Preparación de las juntas.	191
4.7. Soldaduras a baja temperatura.	192
4.7.1. Soldadura fuerte (Brazing).	193
4.7.2. Soldadura blanda (Soldering).	195
4.8. Soldadura por espárragos.	195
4.8.1. Fuente de potencia.	196
4.9. Soldadura por Electro-Escoria (ESW).	197
4.10. Soldadura por resistencia (RW).	198
4.10.1. Soldadura por puntos.	199
4.10.2. Soldadura por resaltes.	200
4.10.3. Soldadura por costura.	200
4.10.4. Soldadura a tope.	201
4.11. Soldadura en estado sólido.	201
4.11.1. Soldadura por fricción – Friction welding (FW).	202
4.11.2. Soldadura por fricción-agitación (Friction stir welding –FSW).	203
4.11.3. Soldadura por forja.	204
4.12. Soldadura aluminotérmica.	205
4.13. Soldadura por arco de plasma (Plasma arc welding - PAW).	205

4.14. Soldadura por rayo láser.	211
4.15. Soldadura por transferencia de metal frío (Cold Metal Transfer – CMT).	213
4.16. Soldadura robotizada.	214
4.17. Simuladores en la formación de soldadores.	217
5. CONSUMIBLES DEL PROCESO DE SOLDADURA.	219
5.1. Clasificación de los electrodos.	221
5.2. Selección del electrodo.	229
5.3. Electrodo especiales.	232
5.3.1. Electrodo de baja aleación.	233
5.3.2. Electrodo de alta aleación (Inoxidables).	235
5.4. Consumibles del proceso de soldadura por arco GMAW.	235
5.5. Consumibles del proceso de soldadura por arco con alambre tubular (FCAW).	239
5.6. Consumibles del proceso de soldadura por arco GTAW.	242
5.7. Consumibles del proceso de soldadura por arco sumergido (SAW).	245
5.7.1. Fundentes granulados (Aglomerado).	247
5.7.2. Fundentes fundidos.	248
6. ROCIADO TÉRMICO.	251
6.1. Terminología del rociado térmico.	254
6.2. Procesos de rociado térmico.	256
6.2.1. Sistemas de rociado térmico por combustión.	256
6.2.1.1. Rociado térmico por combustión de llama convencional.	257
6.2.1.1.1. Revestimientos en polvo fusibles o auto fusibles.	260
6.2.1.2. Oxi-combustible de alta velocidad (HVOF).	263
6.2.1.3. Rociado térmico por detonación (D-Gun).	265
6.2.2. Procesos de rociado térmico por arco eléctrico.	267
6.2.2.1. Rociado térmico por arco eléctrico.	267
6.2.2.2. Rociado térmico por plasma con arco no transferido (APS).	270
6.2.2.3. Rociado térmico por plasma con arco transferido (PTA).	274
6.3. Cuidados con la preparación de piezas.	276
6.4. Tratamientos de los revestimientos con sellantes.	277
6.5. Dinámica de formación de los revestimientos.	277
7. METALURGIA DE LA SOLDADURA.	280
7.1 Dilatación y contracción en la soldadura.	282
7.2. Técnicas para mantener la integridad de soldaduras .	283
7.2.1 Precalentamiento.	284
7.2.2. Poscalentamiento.	287
7.2.3 Alivio de tensiones.	287
7.2.4. Martillado.	289
7.3. Fisuración por hidrógeno.	289
7.4. Transformaciones de fase de estado sólido en el acero.	291
7.5. Fenómenos de cristalización del metal fundido en la soldadura.	292
7.5.1. Efecto de la geometría del charco de fusión o pileta líquida.	296
7.6. Tratamientos térmicos en uniones soldadas.	297
7.7. Zonas metalúrgicas involucradas en una unión soldada.	298
7.7.1. Zona afectada térmicamente (ZAT).	299
7.7.2. El metal de fusión.	303
7.8. Elementos aleantes en el acero.	304

7.8.1. Efecto de los elementos de aleación en los aceros.	305
7.9. Propiedades del metal en el charco de soldadura.	308
7.9.1. Charco de fusión y dilución.	309
7.9.2. Aporte térmico o aporte de calor.	310
7.9.3. Ciclo térmico durante la soldadura.	311
7.9.4. Distribución térmica.	312
7.10. La estructura del metal de soldadura.	313
7.11. Ejercicios de metalurgia de soldadura.	315
8. SOLDABILIDAD.	317
8.1 Entrada de calor.	318
8.2 Aspectos importantes de la soldabilidad.	320
8.3 Pruebas de soldabilidad.	320
8.3.1 Análisis metalográfico.	321
8.3.2 Pruebas mecánicas.	321
8.3.3. Identificación de los metales.	322
8.4 Soldabilidad de algunas aleaciones.	324
8.4.1. Soldabilidad de los aceros de alta aleación.	324
8.4.1.1. Soldabilidad de aceros inoxidable martensíticos.	325
8.4.1.2. Soldabilidad aceros inoxidable ferríticos.	326
8.4.1.3. Soldabilidad aceros inoxidable austeníticos.	326
8.4.1.4. Soldabilidad aceros inoxidable endurecibles por precipitación.	329
8.4.5. Fragilidad por fase sigma y precipitación de carburos.	329
8.5. Soldabilidad aceros al manganeso.	330
8.6. Soldabilidad aceros herramienta.	331
8.7. Soldabilidad de metales diferentes	333
8.8. Soldabilidad hierros fundidos y aceros fundidos.	334
8.9. Soldabilidad aleaciones de níquel.	339
8.10. Soldabilidad aleaciones de aluminio.	339
8.11. Soldabilidad aleaciones de cobre.	341
8.12. Factores que promueven el deterioro de estructuras y piezas mecánicas.	342
8.12.1. Solución a problemas de desgaste a través de recubrimientos protectores.	342
8.12.2. Recubrimientos duros y láminas anti desgaste contra el desgaste abrasivo.	347
8.13. Recuperación por soldadura de un molino vertical ATOX.	348
8.14. Soldaduras y revestimientos poliméricos.	350
8.14.1 Aplicación de la soldadura o revestimiento polimérico.	352
8.14.2 Revestimientos polímero-cerámico.	353
9. DISCONTINUIDADES Y DEFECTOS EN LA SOLDADURA.	355
9.1. Discontinuidades estructurales en la soldadura.	357
9.2. Discontinuidades dimensionales.	370
9.3 Propiedades del metal y la junta.	373
10. RIESGOS Y PRECAUCIONES DE SEGURIDAD.	374
10.1. Prevención y protección en procesos de rociado térmico por arco.	376
10.2. Características de los elementos de soldadura por combustión.	377
10.3. Equipos de protección personal de soldadura.	378
10.4. Exposición a humos y gases.	380
10.5. Exposición al ruido.	382
10.6. Normas de seguridad frente a otros riesgos del proceso de soldadura.	382

10.6.1. Normas de utilización de ropa de trabajo y seguridad industrial.	384
10.7. Normas de seguridad frente a incendios/explosiones en soldadura.	385
10.7.1. Normas de seguridad generales.	385
10.7.2. Normas de seguridad específicas.	386
11. FUNCIONES Y RESPONSABILIDADES DEL INSPECTOR DE SOLDADURA.	389
11.1. Cualidades del inspector de soldadura.	392
11.2. Deberes y aspectos éticos del inspector de soldadura.	395
11.3. Responsabilidades del inspector de soldadura.	398
11.3.1 Inspección previa a la aplicación del cordón de soldadura.	399
11.3.1.1. Planos, normas y especificaciones.	399
11.3.1.2. Revisión de órdenes de compra y recepción de materiales.	400
11.3.1.3. Procedimientos de soldadura y calificación de soldadores y operarios.	400
11.3.1.4. Equipos de soldadura.	401
11.3.1.5. Limpieza, geometría y arreglo de juntas.	401
11.3.1.6. Temperatura de precalentamiento.	402
11.3.2 Inspección durante la aplicación de la soldadura.	403
11.3.3 Inspección después de la aplicación de la soldadura.	403
11.4 Programas de certificación de personal en inspección de soldadura.	405
11.4.1. Requisitos para la certificación de inspectores de soldadura.	406
11.4.2. Niveles de certificación AWS para los inspectores de soldadura.	408
11.4.3. Sistemas internacionales de certificación para inspectores de soldadura.	410
12. DOCUMENTOS QUE GOBIERNAN LA INSPECCIÓN DE SOLDADURA.	412
12.1. Códigos, normas y especificaciones.	414
12.2. Alcance y aplicación de las normas.	415
12.2.1. American Welding Society (AWS).	416
12.2.2. American Society of Mechanical Engineers (ASME).	420
12.2.3. American Petroleum Institute (API).	421
12.2.4. Organización internacional para la normalización (ISO - Internacional Organization for Standarization).	429
12.3. Las especificaciones técnicas.	431
13. CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTOS Y PERSONAL DE SOLDADURA.	432
13.1. Especificación del procedimiento de soldadura (WPS).	435
13.1.1. Especificación del procedimiento de soldadura precalificado.	438
13.2. Calificación de la habilidad del personal de soldadura (WPQ).	439
13.3. Calificación del procedimiento de soldadura (PQR).	441
13.3.1. Recalificación de la habilidad del personal de soldadura.	445
14. INSPECCIÓN DE SOLDADURAS.	448
14.1. Inspección visual de soldadura.	450
14.1.1. Inspección antes de la soldadura.	451
14.1.2. Inspección durante la soldadura.	452
14.1.3. Inspección después de la soldadura.	453
14.2. Procedimientos de inspección de soldaduras.	454
14.3. Herramientas para la inspección visual de soldaduras.	455
14.4. Reporte de inspección de soldaduras.	456

15. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES USADOS EN SOLDADURAS.	459
15.1 Ensayos destructivos en soldaduras.	459
15.1.1. Ensayo tracción.	460
15.1.2. Ensayo de doblez guiado.	464
15.1.3. Ensayo de tenacidad.	467
15.1.4. Ensayo de dureza.	470
15.1.4.1. Indentación (Penetración).	470
15.1.4.2. Ensayo de microdureza.	471
15.1.4.3. Ensayo de macrodureza.	472
16. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN SOLDADURAS.	474
16.1. Inspección por líquidos penetrantes.	476
16.2. Inspección por partículas magnéticas.	478
16.3 Inspección por ultrasonido.	483
16.4 Inspección por radiografía.	492
16.5. Evaluación por corrientes de Eddy.	498
17. GENERALIDADES DE LAS ESTRUCTURAS METÁLICAS.	502
17.1. Uniones en estructuras.	506
17.2. Sistemas de protección para estructuras metálicas.	511
17.3. Análisis estructural.	512
17.4. Uniones Vierendeel.	514
17.5. Introducción a la norma de sismo resistencia NSR 10 Capítulo F.	516
18. BIBLIOGRAFÍA.	524

AGRADECIMIENTOS

Quiero manifestar mis agradecimientos a quienes contribuyeron al resultado final del libro de forma directa o indirecta, ya que me sería imposible lograr terminarlo sin el aporte de cada uno de ellos. Al Ing. Juan Sebastián Cortés Quintero por sus aportes, colaboración y apoyo a este trabajo al igual que el Ing. Erwin Calvo Henao. Al profesor José Orlando Gómez que me introdujo al mundo de la soldadura. A la empresa SAGER por darme la oportunidad de trabajar con ellos y a todos sus integrantes por todo lo aprendido en ese año de trabajo. A la Universidad Tecnológica de Pereira por darme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente.

DEDICATORIAS

Dedicado a mi familia que me entienden, aprecian, y me tienen paciencia dándome su apoyo y amor diario, a mis hijos Silvia Stephany, Laura Sofía, Claudia Lucía y José Luddey Marulanda Alucema, que son mi impulso, ilusión y felicidad diaria, por la cual agradezco a Dios, a mi esposa Claudia Alucema Gallo, que es mi soporte en tiempos difíciles y quien cuida de mí y me hace amarla como en el primer día, a mi hermano Cristian F. Pedraza, que ha enseñado mucho a veces sin darse cuenta a mi madre Alba Rosa Arévalo y mi padre José L. Marulanda V por sus consejos y sembrar en mí las ganas de ser mejor cada día y a Miguel Ángel por la enseñanza de vida que me dio.

JOSÉ LUDDEY MARULANDA ARÉVALO

PRÓLOGO

El avance tecnológico logrado en los procesos de soldadura durante los últimos años, le ha dado un lugar privilegiado a la soldadura en el sector de la construcción, como también en industrias como la petrolera, química, automotriz, metalmecánica entre otras. La soldadura es fundamental para el desarrollo de proyectos de gran envergadura que necesitan del proceso de unión de sus productos y que sería imposible de realizar por otros medios, lo cual constituye un motor de desarrollo industrial en todos los países. Por medio de este proceso se pueden fabricar y ensamblar estructuras como recipientes a presión, puentes, edificios y barcos entre otros; de modo que estas uniones queden en excelente estado, ya que la internacionalización de la economía hace necesario fabricar productos de alta calidad para que puedan competir y satisfacer las necesidades de nuevos mercados en Colombia y en otros países.

Los códigos, normas, especificaciones y procedimientos de soldadura son herramientas muy necesarias que se deben seguir para una buena aplicación de soldadura, dado que aumenta la confiabilidad y se asegura calidad en el producto terminado. En los procesos de fabricación, es la soldadura uno de los más regulados, debido a las severas condiciones de servicio en las que se encuentran los elementos soldados.

Hay antecedentes que demuestran un desconocimiento en el área de la soldadura por parte de empresas afines con este proceso, ya que no saben cómo evaluar y garantizar una unión soldada. Lo anterior se debe a que existe poco o deficiente conocimiento en el área de la soldadura por parte de la gran mayoría de ingenieros que ocupan los cargos de supervisores e inspectores de control de calidad en el área de soldadura y además a la falta de exigencia y necesidad de contar con soldadores calificados y/o certificados, pues solo para la industria colombiana del petróleo se necesitarían más de tres mil nuevos soldadores calificados y/o certificados entre el 2012 y 2017. Todo lo anterior ha sido evidenciado en el estudio de caracterización del sector metalmecánico y área de soldadura realizado por el SENA en el 2012 (1, 2).

En esta ciencia se requiere de conocimientos en diferentes áreas que van desde el diseño e ingeniería de las diferentes máquinas, equipos y estructuras, como también de fabricación, montaje, mantenimiento, inspección y gestión de calidad. Por lo anterior, es muy importante potenciar el recurso humano en esta área de la soldadura, ya que los proyectos de ingeniería han aumentado notablemente en cuanto a tamaño y cantidad, incrementando la demanda de profesionales calificados en el diseño, construcción, control e inspección de estructuras y componentes soldados.

En ocasiones se requiere realizar reparaciones de partes o piezas de maquinaria y algunos de los conocimientos de la soldadura de producción no son aplicables y para esto requiere tener suficientes conocimientos en soldadura de mantenimiento y de esta forma realizar una buena selección de los materiales usados para soldar, que generen una unión con buenas propiedades físicas, mecánicas y de calidad. Para lograr lo anterior, se debe tener algunos conocimientos de tribología, para que se haga una buena selección del metal de aporte de soldadura, a partir del conocimiento de la forma como se puede deteriorar la pieza o equipo y se tenga una mejor comprensión de lo que ocurre en el proceso de soldadura.

La industria requiere de actualización en los procesos de soldadura, manejo de

procedimientos y equipos de manufactura, así como la gran cantidad de normas y códigos dirigidos al aseguramiento de calidad, seguridad industrial y medio ambiente, que requieren personal altamente calificado para realizar dichas actividades. La inspección de soldadura se realiza para comprobar el estado y la calidad de los trabajos de soldadura realizados en la fabricación, construcción, montaje y reparación de equipos, estructuras e instalaciones. El propósito de la inspección de soldadura es determinar y asegurar que los ensambles soldados satisfagan los requerimientos de la normatividad aplicable, ya que es responsabilidad de las empresas fabricantes de productos soldados comprobar que éstos sean de calidad; entendiéndose como calidad, que los productos estén de conformidad con los requerimientos del cliente y lo establecido en códigos, normas y especificaciones de soldadura. En la calidad de la soldadura intervienen varios factores como los económicos,

seguridad, normatividad, regulaciones gubernamentales, competencia laboral y el empleo de diseños menos conservativos, esto hace que haya muchas personas involucradas en la creación de un producto soldado de calidad, por tal motivo, no hay un único responsable en la obtención de una soldadura confiable (2).

Este libro pretende aportar en el conocimiento básico de la soldadura y cómo se debe realizar una inspección de una unión soldada y cuáles son los pasos a seguir antes, durante y después de realizar una soldadura; para que ingenieros y profesionales afines puedan tener un mejor conocimiento de cómo se realiza la inspección a las juntas soldadas y puedan entender el proceso metalúrgico de la soldadura, dejando clientes satisfechos e instalaciones seguras.

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de soldadura se están modernizando a grandes pasos, aunque los principios básicos sean los mismos. A pesar de los grandes avances tecnológicos en la soldadura, sigue siendo susceptible a fallas, razón por la cual, el inspector de soldadura juega un papel muy importante en la calidad de las juntas soldadas. La soldadura posee su propia terminología, al igual que la mayoría de procesos industriales. Es fundamental conocer y entender la terminología de soldadura, para lograr una comunicación efectiva con el personal, que está relacionado con las diferentes actividades de la unión soldada, además, es indispensable un uso correcto y preciso de esta terminología (2).

Durante el proceso de soldadura ocurre la coalescencia o fusión del material que se quiere unir y posteriormente se solidifica; estos cambios de estado se llevan a cabo en tiempos muy cortos y afectan las propiedades físicas, mecánicas, químicas y dimensionales de los materiales en la unión soldada; por tal motivo, el inspector de soldadura o ingeniero de soldadura tiene que conocer de estos temas, para que pueda controlar las variables y establecer los límites operativos que permitan obtener soldaduras sanas, capaces de soportar los requerimientos mecánicos y demandas extremas del servicio en su vida útil. Las uniones soldadas pueden presentar discontinuidades que pueden poner en riesgo la integridad y la seguridad de las estructuras o equipos. Estas discontinuidades varían en tamaño, localización, distribución, frecuencia y naturaleza. Para establecer los criterios de aceptación de las discontinuidades se usan normas y códigos de soldadura, que establezcan los criterios de aceptación de acuerdo al tipo, tamaño, número y distribución de estas discontinuidades. Una de las principales funciones del inspector de soldadura es establecer si la unión soldada cumple con los criterios de aceptación del código o la norma que se está usando para la construcción de la estructura o el equipo; los códigos, normas y especificaciones son documentos que rigen y regulan las actividades industriales, los cuales establecen los lineamientos de las actividades para la fabricación y construcción de bienes, cuyo propósito es el aseguramiento de la calidad de los productos, para que sean confiables

y a bajo costo, evitando a las personas relacionadas con las operaciones estén expuestas a peligros indebidos y a condiciones que resulten perjudiciales para la salud (2).

El inspector de soldadura debe estudiar y capacitarse en su labor de manera continua, ya que los programas de calidad de soldadura empiezan antes de hacer el primer corte de metal o usar el primer electrodo, por esta razón, el inspector de soldadura debe comprender todos los aspectos del proceso de fabricación. Antes de empezar a soldar, el inspector debe conocer de primera mano cómo se construirá la obra, para ello debe revisar planos, especificaciones y normas para determinar la configuración de los componentes, sus requerimientos específicos de soldadura y qué tipo de inspección se necesita; tanto pruebas destructivas como no destructivas. Durante la revisión se buscará la necesidad de cualquier procedimiento especial en el proceso de fabricación de la obra. Al empezar la soldadura, el inspector debe supervisar directamente todas las etapas del proceso para asegurar que son efectuadas en forma apropiada. Si cada etapa del proceso es efectuado satisfactoriamente, la inspección final servirá simplemente para confirmar la calidad de la soldadura (2, 3, 4).

El inspector de soldadura es una persona altamente especializada, cuya función principal es controlar y asegurar la calidad de los trabajos de fabricación, construcción y montaje de equipos, estructuras e instalaciones en las que intervienen procesos de soldadura como lo son: construcción y mantenimiento de instalaciones de generación de energía; plantas y equipos de procesos químicos, refinerías de petróleo; líneas de tuberías para distribución de petróleo y sus derivados; puentes y edificios; entre otras. El inspector de soldadura es quien determina si las juntas soldadas "*Weldments*" satisfacen los criterios de aceptación o rechazo de un código o norma específica que se está aplicando a la construcción soldada. Por lo anterior, el inspector de soldadura debe estar completamente familiarizado con los procesos de soldadura y de corte, procedimientos de calificación de personal y de soldadura, con los metales base y de aporte que pueden ser usados, las limitaciones de los ensayos empleados; metalurgia de la soldadura, simbología y terminología de la soldadura para que sea capaz de leer e interpretar dibujos y hacer reportes y juicios responsables. Para que el inspector de soldadura se pueda certificar debe demostrar que tiene experiencia y

conocimientos teóricos y prácticos en la evaluación de soldaduras, lo anterior se logra presentando y aprobando pruebas de conocimiento y anexando certificados de experiencia laboral en el área de soldadura (2, 3, 4).

En Colombia hay una gran necesidad de inspectores de soldadura certificados internacionalmente, que validen y aumenten la calidad de los productos soldados; además, nuestro país está realizando tratados de libre comercio con diferentes países y la calidad de los productos es un factor muy importante para competir. En la actualidad hay muchas personas que realizan el trabajo de inspección de juntas soldadas, sin un certificado que avale su trabajo, lo cual genera que los productos soldados no tengan una calidad adecuada y/o que los costos de las uniones soldadas sean mayores, debido al aumento de soldaduras rechazadas. Colombia sólo contaba en el 2016, con alrededor de 55 inspectores de soldadura certificados internacionalmente por la AWS y otros 600 inspectores de soldadura certificados por empresas que cuentan con un buen prestigio a nivel nacional, pero estas certificaciones no sirven o cuentan con el reconocimiento internacional (1, 2).

El inspector de soldadura es quien determina si las juntas soldadas cumplen con los requisitos especificados en la norma o código, dependiendo de la parte que contrata los servicios de inspección, ya que se pueden señalar diferentes enfoques, alcances y limitaciones en la participación del inspector; lo anterior se debe a que hay empresas que tienen un sistema de gestión, con normas internas, las cuales han sido establecidas bajo un código o norma específica y desarrollada por el equipo técnico de la empresa. La inspección y los ensayos destructivos y no destructivos que se realizan antes, durante y después del ensamble soldado, en la fabricación y montaje de estructuras, deben ser asumidas por parte del fabricante o contratista, con el propósito de asegurar que los materiales y la mano de obra cumplan los requisitos de los documentos contractuales. La inspección y las pruebas de verificación deberían de ser realizadas por un inspector independiente del fabricante o contratista y los resultados de dichas inspecciones y pruebas deben ser reportadas al propietario o cliente y al contratista. Las funciones y responsabilidades del inspector se pueden abordar desde el punto de vista de la inspección y

pruebas de verificación descritas por la AWS (*AMERICAN WELDING SOCIETY*), en el texto “Tecnología de la inspección de soldadura”; en el código AWS *Structural Welding Code – Steel D1.1/D1.1M:2015* y en la norma para la certificación de inspectores de soldadura AWS QC1:2016 (2, 3, 5).

1.1. Sistemas de gestión en soldadura

En general, todas las actividades empresariales se deben llevar a cabo dentro de una disciplina que asegure satisfacer las necesidades de los clientes y que se ejecuten de una manera eficaz y oportuna. Esto requiere de: (2)

- Personal con los conocimientos y habilidades necesarias.
- Sistemas que permitan ejercer ese conocimiento y habilidad al personal.
- Insumos o materiales que puedan cumplir con los requisitos del trabajo.
- Un plan de las actividades que se deben alcanzar.
- Medios para transmitir instrucciones a las partes y personas involucradas.
- Medios de control de las actividades y/o demostrar que sus productos se ajustan a los requisitos.

Hay muchas etapas en el diseño y construcción de un proyecto y generalmente se paga de acuerdo con el avance del trabajo realizado. La evidencia de los logros y la verificación de la calidad del trabajo tienen que ser permitidos, al igual que los procedimientos para abordar los conflictos de avance de obra y de calidad de la misma, entre otros. El producto es uno solo y debe ser descrito en un pliego de condiciones; no hay ningún producto antes de su uso como una muestra o modelo. En este punto, se puede ver una divergencia en los enfoques de la especificación escrita. En un extremo están los clientes que sólo dicen qué elementos necesitan y que el constructor está obligado a hacer, lo cual se denomina una especificación de desempeño; por ejemplo, una grúa para levantar cierta cantidad de toneladas. El cliente deja por completo al proveedor el diseño, la fabricación e instalación de la grúa y este debe hacer que funcione. El futuro dueño de la grúa puede no saber nada

del diseño de grúas o incluso de leyes y reglamentos en torno a su construcción, aunque tendrá que aprender acerca de las normas relativas a la utilización de las grúas, pudiendo pedir solamente lo que necesita. En el otro extremo está el cliente que describe lo que quiere con gran detalle. Por ejemplo, una empresa de productos farmacéuticos, la cual puede diseñar sus propios procesos y su departamento de ingeniería sabe exactamente lo que debe tener su planta. Ellos escribirán una especificación con gran detalle. Qué enfoque se utiliza, depende en gran medida de la naturaleza del cliente. En la práctica, tales extremos son raramente seguidos por numerosas razones. En el caso de la grúa, el cliente tendrá que concretar ciertos parámetros para el buen funcionamiento, además, las construcciones y equipos estándar, aunque aceptables, no son los mejores. Por otro lado, la empresa química puede conseguir lo que pide, pero el precio puede ser muy alto debido al trabajo específico. Además, ciertos trabajos pueden estar por fuera de norma y causar problemas que conllevarán a pérdidas o daños para el cliente (2, 6, 7).

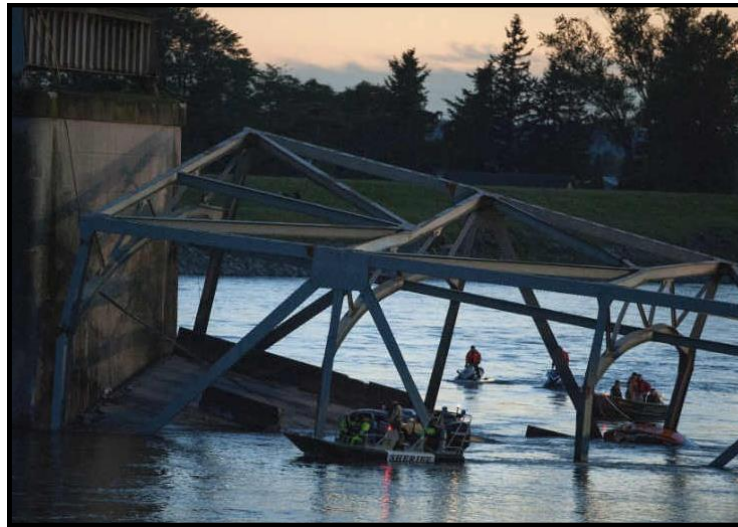
Un contrato comercial suele ser un acuerdo entre dos partes, por el cual una de ellas suministra o hace algo por la otra parte. Lo que tiene que ser suministrado o que se ha comprado, debe ser explicado claramente con una descripción detallada de la compra. Para las compras simples, esta descripción puede ser simplemente el nombre de un artículo que se desea obtener y la práctica empresarial común es entrar en un simple acuerdo sobre la base de una orden de compra. Por lo general, la descripción del producto es dada por el proveedor de este, tal y como aparece en su catálogo o folleto. Tal método puede ser utilizado para productos de ingeniería, pero sólo cuando dicho producto se hace de elementos estándar. Para los elementos más complicados y que solamente se compran una vez, como una estación de bombeo, calderas de potencia y líneas de bombeo de crudo, la orden de compra no es un instrumento adecuado (2). La mayoría de los clientes se han vuelto cada vez menos tolerantes con los retrasos en las entregas y con los productos que no cumplen con los requerimientos de calidad según lo especificado. Las causas y las fuentes de los retrasos, como también la baja calidad del producto se deben analizar, para hacer las correcciones necesarias, las cuales deben estar establecidas en un sistema de gestión que impida que esto vuelva ocurrir. La inspección post fabricación ha sido considerada como

una forma de control de calidad muy poco rentable, ya que detecta elementos no conformes con lo establecido, después de todo lo que pudo hacerse para corregir los problemas de calidad. El resultado es que estas partes se desperdician y aumentan los costos, un enfoque más eficaz consiste en controlar el proceso para que los parámetros que afectan la conformidad del producto se mantengan dentro de los límites estipulados para producir según la conformidad con la norma de fabricación que se aplique (2).

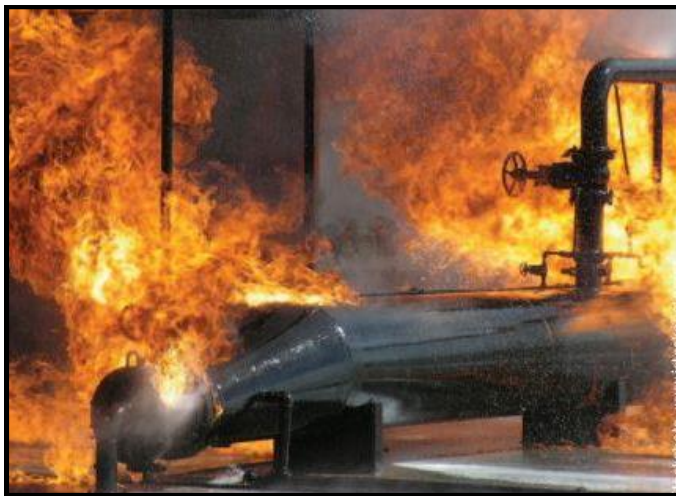
Los sistemas de gestión se han aplicado a las actividades de fabricación de uniones soldadas desde hace tiempo y se entiende que una especificación de procedimiento de soldadura, es más de lo que se entiende generalmente como un procedimiento. La especificación del procedimiento de soldadura (WPS) es una declaración de todo lo que debe ser realizado para la fabricación de una unión soldada. En el WPS se definen materiales, proceso de soldadura, consumibles de soldadura, preparaciones de biseles, posición de soldadura, velocidad de avance, tipo de corriente, amperaje, voltaje y tipo de electrodo, temperatura de precalentamiento, la secuencia de los cordones de soldadura y tratamiento térmico entre otros, ya que estos son puntos importantes en un procedimiento de soldadura. Gran parte de las soldaduras aún se realiza manualmente, lo que da un potencial de variabilidad en los resultados, como es el caso con cualquier proceso operado por la mano del hombre (2, 4, 5, 7). En la figura 1.1, se observan los posibles daños catastróficos que pueden ocasionar la falla de una soldadura y el fallo de una soldadura.

En una operación de soldadura manual, los materiales y el equipo son parte del sistema de fabricación. Para adquirir confianza y garantizar que el producto se ajusta a las especificaciones del soldador, el equipo y el procedimiento que se va a utilizar, se debe confirmar que lo anterior está en la capacidad de hacer el producto con la calidad requerida. Esta confianza se adquiere mediante la comprobación de que el equipo va a trabajar dentro de los límites de funcionamiento, y probando la destreza del soldador con la realización de una unión de prueba para asegurarse que tiene las habilidades para realizar el trabajo real. Esta unión soldada se evaluará con pruebas destructivas o no destructivas según lo especificado con la norma de trabajo. Lo anterior proporciona evidencia de que los

soldadores y los procedimientos de soldadura son capaces de proporcionar soldaduras sanas según lo establecido por los códigos y normas. Después de realizadas las pruebas destructivas y no destructivas se registran los datos y se mantienen como testimonio de prueba; estos certificados deben ser firmados por el inspector de soldadura o la autoridad competente (2).



a) Caída de puente



b) Accidente en petrolera



c) Falla soldadura

Figura 1.1. Daños catastróficos que pueden ocasionar la falla de una soldadura y el fallo de una soldadura (2, 8, 9)

En función de los intereses de las partes involucradas en el trabajo, las pruebas de soldador y pruebas de procedimientos de soldadura pueden ser presenciadas por el cliente o una

tercera parte independiente en su nombre. Hay algunas industrias con esquemas de certificación y calificación para realizar una vigilancia independiente. Esto está pensado para proporcionar confianza en el personal del fabricante, en los equipos, la organización y funcionamiento, para que los clientes puedan verificar que el fabricante es competente para hacer el trabajo, reemplazando las pruebas independientes para cada cliente que tendrían que pagar ellos, como parte del contrato. Estos sistemas tienen sus limitaciones y la visualización de un certificado de conformidad con alguna norma no representa ninguna garantía de que una empresa o un individuo realizarán el trabajo según sea necesario en cada situación particular, pero aumenta enormemente la probabilidad de que se cumpla con los requisitos de calidad del producto. Al igual que en cualquier otro negocio, la producción de estructuras soldadas requiere de personas con conocimientos del tema, bien informadas, capacitadas y comprometidas dentro de un sistema de gestión adecuado. En resumen, la confianza en la fabricación de estructuras soldadas es un diseño viable y validado (en lo posible por un programa de simulación), que se construye teniendo en cuenta: (2)

- Soldadores competentes, como se demuestra por los certificados de calificación del soldador.
- Procedimientos de soldadura soportados por (WPS) especificaciones del procedimiento de soldadura que han sido probados.
- Personal de inspección competente, como se demuestra por certificados de inspección en soldadura.

1.2. Los estándares o normas en soldadura

La palabra 'estándar o norma', ya es de uso común en la ingeniería. Esta es una especificación para un material o producto manufacturado, que puede ser escrita por empresas para su uso interno, y por los organismos nacionales e internacionales para uso público. La palabra "estándar" se refiere también a los procedimientos estándar, como pruebas de materiales y exámenes de personal. Existen otros tipos de "estándares" en un contexto diferente, por ejemplo, el metro estándar es la medida básica de longitud. Las

normas o estándares tienen una serie de propósitos. A un nivel sencillo, su uso permite mantener una buena calidad y minimizar el costo de producción y el mantenimiento de productos de ingeniería a través de la reducción de la variedad y la intercambiabilidad resultante de partes similares. Un ejemplo histórico de los efectos de la falta de normalización fueron las roscas de tornillo. Hasta la década de 1960, algunos países utilizaban varios tamaños de roscas en pulgadas, que incluían diferentes formas. Los fabricantes tenían que asegurarse de que todos los repuestos o pernos estaban con el mismo paso (hilo) que usaban. Finalmente, el sistema métrico fue adoptado por la mayoría de los países y este asunto se hizo más fácil de manejar, tanto en las fábricas como en los departamentos de mantenimiento de los clientes (2).

Un estándar debe ser escrito no sólo para definir las características del producto, sino también para definir cómo el producto puede demostrar que se ajusta a la norma. Esto es factible cuando, por ejemplo, se especifican la composición del material, esfuerzos que soportan, dimensiones, entre otras. Sin embargo, cuando llegamos a algo tan grande como un edificio o un puente, ¿cómo demostrar la conformidad con la norma? Una forma, por supuesto, es llevar a cabo un conjunto completamente independiente de cálculos a partir de diseños originales. Otra es la de poner cargas sobre ella y medir las tensiones o medir tensiones en servicio. Hay que decir que las normas deben ser utilizadas sólo como un apoyo a la buena ingeniería, y no como su fundamento. En cualquier aplicación, la norma por sí sola no puede contener todos los requisitos del cliente o del fabricante, además, la creación de un producto de ingeniería de calidad requiere que se especifique, se diseñe y se fabrique por ingenieros competentes. Las normas se derivan conjuntamente por las partes interesadas en la elaboración y el uso del producto, así como por las demás personas interesadas (2).

En el campo de la fabricación de estructuras soldadas hay muchas normas que describen los materiales, consumibles de soldadura, instalaciones de soldadura, la gestión de la documentación, operaciones de soldadura, técnicas de inspección, procedimientos de soldadura y el producto fabricado en sí. Naturalmente, muchas de estas normas serán

requeridas por los fabricantes y clientes en sus especificaciones de productos, por desgracia, no siempre con un conocimiento adecuado de su alcance y contenido. Existen muchas especificaciones realizadas por las empresas, que se han utilizado durante años, y que pueden haber sido modificadas por personas sin conocimientos de soldadura, estos cambios se realizan para adaptarse a nuevos puestos de trabajo y para los que las normas citadas originalmente resultan inapropiadas o incluso, pueden entrar en conflicto con la base del diseño. Esta es una circunstancia en la que se necesita al ingeniero o inspector de soldadura para asesorar sobre la interpretación y los cambios a la especificación del procedimiento de soldadura. Hay que resaltar que todo el personal que participa en la producción de un bien o servicio, ya sean diseñadores, proveedores, fabricantes, personal de montaje, soldadores, supervisores, inspectores entre otros, tienen la necesidad de conocer los códigos o normas que aplican a sus actividades y dependiendo del nivel de estudio y la responsabilidad del trabajo deberá conocer por lo menos, las secciones particulares de los códigos o normas que aplican a sus actividades laborales (2, 4, 7).

1.3. Costo en la calidad de soldaduras

Es frecuente que el concepto de calidad se asocie a la competitividad de un producto o servicio, reconociéndola como la capacidad para satisfacer los requerimientos del cliente. La gestión de la calidad no incrementa los costos totales de producción, ya que cuando se analiza el impacto real de la gestión de la calidad en los costos de la empresa, este provoca un incremento de algunos costos, pero contribuye a disminuir otros. En la calidad de las soldaduras hay dos tipos de costo; a) los costos necesarios: logran y mantienen un nivel definido de trabajo, incluyendo la prevención y la inspección. Los costos de prevención son los asociados a toda acción destinada a asegurar que las cosas no van a fallar. Los costos de inspección son los costos de averiguar si las cosas están mal a fin de que se puedan tomar medidas de prevención o corrección. b) Los costos evitables: estos costos ocurren cada vez que se hace lo que no se debe hacer o cuando las cosas se hacen de manera incorrecta. Estos costos evitables incluyen costos de evaluación de fallos, reparación y re-inspección (2, 10,11).

Los costos de fallas son los costos incurridos cuando un cliente está o estará insatisfecho. Se paga entonces el precio de una reputación dañada, del trabajo repetido, desperdicios, sanciones legales, cargos especiales o pérdida de prestigio. Los costos de calidad forman parte integral del costo de producción, estando presentes en los beneficios que se reflejan en el estado de resultados de una organización, pero no se cuantifican por separado, lo que impide su adecuado control y análisis. Referido a este tema, tradicionalmente la contabilidad de costos se ha ocupado de los *re-procesos* que se realizan en aquellos productos que se alejan de la calidad del diseño para acercarlos a ella (reparaciones). Sin embargo, poner énfasis en la calidad puede constituirse en un apoyo que identifique y elimine las causas de los errores y del reproceso, reduciendo costos y logrando que haya más producción para cumplir con las fechas de entrega (2, 10, 11). En la figura 1.2 se observa un esquema del punto de equilibrio entre calidad y costos de fabricación.

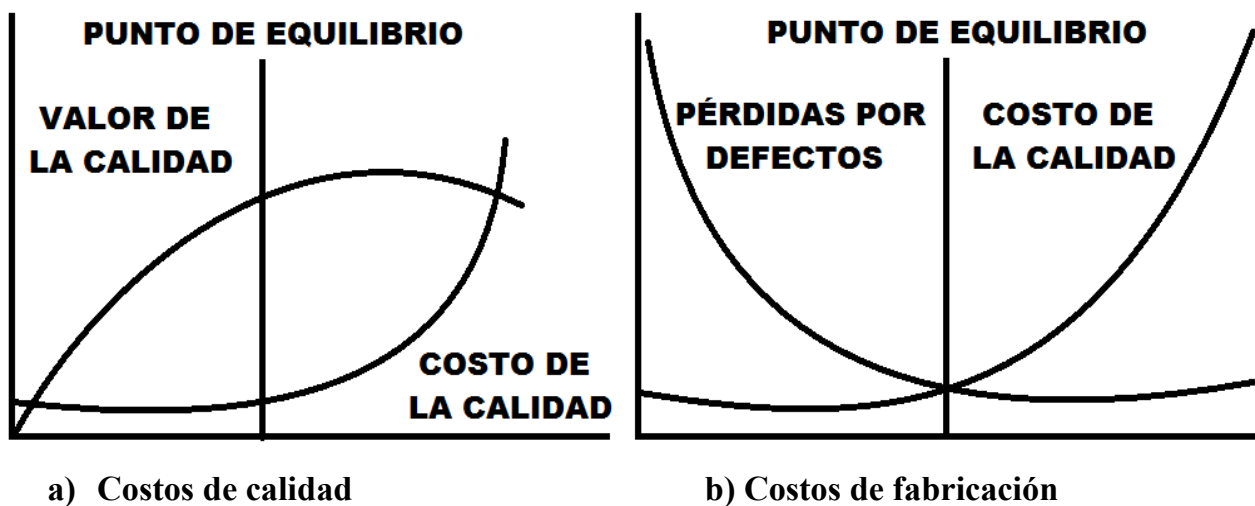


Figura 1.2. Esquema de la calidad óptima de fabricación (2, 11)

Se plantea entre los aspectos necesarios para llevar a cabo la evaluación de la calidad, o sea, la revisión del estado de la calidad en todo el proceso, el costo de la baja calidad, dicho de otra forma, aquellos costos en que no se hubiera incurrido si la calidad fuera perfecta, siendo la diferencia entre el costo actual de un producto y el costo reducido que resultaría si no hubiera posibilidad de fallos ni defectos en su elaboración. Comúnmente se utilizan cuatro categorías para identificar los componentes de los costos totales de la calidad como

los costos de prevención, costos de evaluación, costos de fallos internos y los costos de fallos externos (2, 12).

Los *costos de prevención* se definen como aquellos en que se incurre al intentar reducir o evitar los fallos, o sea, son costos de actividades que tratan de evitar la mala calidad de los productos o servicios (manejo de códigos y normas, servicio de inspección, costos de formación, revisión, mantenimiento preventivo, entre otros) (2).

En el caso de los *costos de evaluación* se refieren a aquellos que se producen al garantizar la identificación antes de la entrega a los clientes, de los productos o servicios que no cumplen las normas de calidad establecidas (costos de medición, análisis e inspección) (2).

Los *costos de prevención y evaluación* son considerados como los costos de obtención de la calidad, denominándose costos de conformidad y se consideran controlables debido a que la empresa puede decidir sobre su magnitud atendiendo a los objetivos propuestos (2).

Los *costos de fallos internos* están asociados con defectos, errores o no conformidad del producto o servicio, detectados antes de transferirlo al cliente y que por tanto éste no percibe y no se siente perjudicado (desperdicios, reparaciones, re-inspecciones, entre otros). Los costos de *fallas externas*, están vinculados con problemas que se encuentran después del montaje de elementos estructurales o luego de brindado el servicio al cliente (costos de garantía, concesiones, devoluciones, entre otros). Estos costos se identifican como costos de la *no calidad* e incluyen el consumo de factores adicionales. El análisis de estos tipos de costos indica que si se aumenta el relativo a la obtención de la calidad, se disminuya el costo por concepto de fallos tanto internos como externos. La actuación de las empresas sobre los costos totales de calidad debe ser eficaz y tendiente a reducirlos tomándose en consideración los aspectos siguientes: (2)

1. Invertir en actividades de prevención y evaluación para conseguir reducir los fallos.
2. Atacar directamente los fallos visibles.

3. Reducir los costos de evaluación conforme la mejora se vaya haciendo efectiva.
4. Buscar una nueva orientación a las actividades de prevención para alcanzar la mejora continua.

Suministrar un producto o servicio en el cual su calidad haya sido diseñada, producida y sostenida a un costo económico y que satisfaga por entero al consumidor, es el principal objetivo de efectuar un control de calidad sobre un proceso de producción. El control total de la calidad es un sistema efectivo de los esfuerzos de varios grupos en una empresa para la integración del desarrollo del mantenimiento y de la superación de la calidad con el fin de hacer posibles: mercadotecnia, ingeniería, fabricación y servicio; a satisfacción total del consumidor y al costo más económico. Al incluir los costos de control de calidad preventivos dentro del presupuesto de construcción de una estructura, es posible ver cómo los costos de calidad de reparaciones, revisión de procesos, re-inspecciones, entre otros, se reducen significativamente. Cuando se ha implementado un sistema de control de calidad en montaje de estructuras metálicas es muy común ver que los tiempos de entrega se cumplen y los retrasos por reparaciones, re-inspecciones, e incluso reposiciones se reducen en gran medida en comparación con proyectos que no incluyen ciertos procedimientos de control de calidad (2, 10, 12).

1.4. Costos en las operaciones de soldadura

En los productos manufacturados por soldadura, el costo de la soldadura juega un papel crucial en las decisiones de la producción, en donde hay variables que afectan el costo total, incluyendo el costo del equipo, el costo de la mano de obra, el costo del material, y el costo de la energía eléctrica, entre otros; además estos productos generalmente tienen tipos de entregas cortos, bajo precio y calidad requerida por el mercado, lo cual lleva a darles un nivel de beneficio razonable, para que se logre la continuidad de las industrias. El interés en los costos de las operaciones de soldeo, se debe tanto a la magnitud de los mismos como a su impacto en la productividad, dada la importancia que tiene la soldadura en el proceso de fabricación. Las empresas tienen que afrontar una fuerte competencia y para mantenerse en

el mercado deben mantener la calidad y realizar innovaciones continuamente en cuanto a materiales y procesos de producción entre otros; cuando no se realiza la mejora continua y la innovación, se puede dejar de trabajar por perder competitividad (2, 13, 14).

Como la soldadura es una actividad importante en la industria metalmecánica es necesario considerarla en detalle y de forma global para comprender los costos que implica. Generalmente, los costos de la soldadura se producen durante las actividades anteriores a la aplicación del primer cordón de soldadura; es decir, durante el diseño de la construcción, elaboración de planos, preparación de trabajo, calificación o selección de soldadores, lo cual depende de la organización general de la empresa. Los costos de producción se generan en fases que tienen que ver poco con la aplicación del cordón de soldadura, mientras que los costos de fallos se producen en fases posteriores cuando generalmente, ya casi nada se puede cambiar (2). En la figura 1.3. Se observa un esquema de las fases en que se generan y se producen los costos.

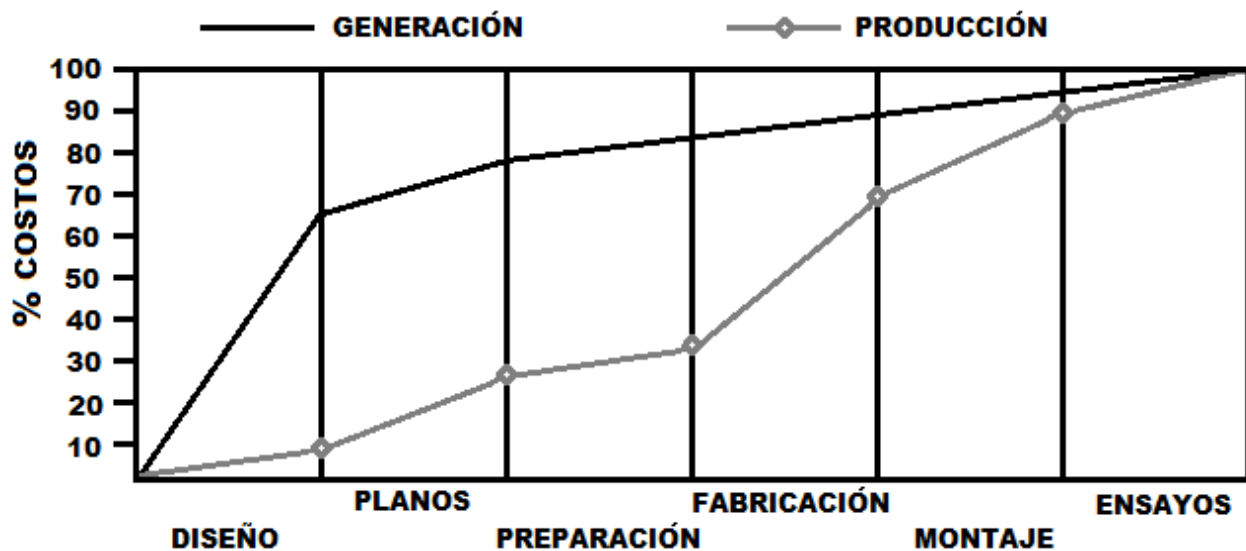


Figura 1.3. Fases en que se generan y se producen los costos (2, 13)

En muchas ocasiones, la mayor influencia sobre la producción (unión soldada) está en el área donde las personas tienen pocos conocimientos del proceso de soldadura y generalmente a medida que disminuye la influencia en la toma de decisiones el

conocimiento específico aumenta. Por lo anterior, es muy importante mejorar los conocimientos sobre el proceso de soldadura a los niveles más altos de la toma de decisiones (gerentes, directores, diseñadores entre otros); no hay que llegar a volverlos grandes expertos, pero sí conseguir que a ese nivel exista la suficiente comprensión sobre el proceso de soldadura y las normas que lo rigen para que se tomen las decisiones correctas. Aunque las grandes empresas generalmente tienen personal calificado en todos los niveles de toma de decisiones y el inspector de soldadura deberá ayudar a los directivos en la toma de decisiones para mejorar la calidad y reducir los costos, cuando estos lo requieran, además deberá revisar los documentos y planos de fabricación para hacer la revisión correspondiente antes de empezar el proceso de construcción (2, 13, 14).

Dependiendo del proceso, el costo del equipo puede variar según su precio, desde muy económico, para métodos como la soldadura por arco con electrodo recubierto y la soldadura de oxi-combustible, a extremadamente costoso, para métodos como la soldadura de rayo láser y la soldadura de haz de electrones. Debido a su alto costo, éstas son solamente usadas en operaciones de alta producción. Similarmente, debido a que la automatización y los robots aumentan los costos del equipo, solamente son implementados cuando son necesarios para alta producción. El costo de la mano de obra depende de la velocidad de deposición (velocidad de soldadura), del salario por hora y del tiempo total de operación, incluyendo el tiempo de soldar y del manejo de la pieza. El costo de los materiales incluye el costo del material base y de relleno y el costo de los gases de protección. Finalmente, el costo de la energía depende del tiempo del arco y el consumo de energía de la soldadura. Para los métodos manuales de soldadura, los costos de trabajo generalmente son la gran mayoría del costo total. Como resultado, muchas medidas de ahorro de costo se enfocan en la reducción al mínimo del tiempo de operación. Para hacer esto, pueden seleccionarse procedimientos de soldadura con altas velocidades de deposición y los parámetros de soldadura pueden ajustarse para aumentar la velocidad del proceso. La mecanización y la automatización son frecuentemente implementadas para reducir los costos de trabajo, pero a menudo ésta aumenta con el costo de equipo y crea tiempo adicional de disposición. Los costos de los materiales tienden a incrementarse

cuando son necesarias propiedades especiales y los costos de la energía normalmente no suman más que un porcentaje del costo total de la soldadura. En años recientes, para reducir al mínimo los costos de trabajo en la manufactura de alta producción, la soldadura industrial se ha vuelto cada vez más automatizada, sobre todo con el uso de robots en la soldadura de punto por resistencia (especialmente en la industria automotriz) y en la soldadura de arco; además se viene desarrollando la soldadura de materiales diferentes (p. ej. acero con aluminio) y nuevos procesos de soldadura como la soldadura por láser entre otras (2, 13, 14).

1.2.1. La estimación de costos

La estimación de costos es una predicción de los gastos que pueden suponer la fabricación de un producto. En esta estimación se debe incluir los costos de fabricación y los gastos de administración, almacenaje, manejo y utilidades. En esta estimación se debe hacer un análisis de todos los factores involucrados en la producción de un determinado producto. Algunos de los propósitos y aplicaciones de la estimación de costos son: (2, 13, 14)

- Proporcionar información para determinar el precio de venta o evaluación de contratos.
- Conocer si un producto puede fabricarse y comercializarse con beneficio, considerando los precios existentes y la competencia futura.
- Reunir datos para la toma de decisiones.
- Determinar el valor de la inversión en herramientas y equipos para fabricar un producto o componente.
- Conocer los mejores y más económicos métodos, procesos y materiales para la fabricación de un producto.
- Establecer la base de un programa de reducción de costos, indicando los ahorros que se pueden conseguir cambiando los procesos o métodos de operación.
- Predeterminar normas de fabricación que pueden emplearse desde el inicio de la fabricación para el control de los costos de operación.

- Predecir el efecto de los cambios en el volumen de producción sobre los beneficios futuros, por la introducción de métodos automáticos, mecanizados y otras mejoras en la fabricación en serie.
- Establecer los requisitos del personal y predecir las necesidades del material, equipos y demás factores necesarios para la fabricación de un producto en el tiempo y cantidades requeridas.

Los costos de fabricación incluyen la materia prima, mano de obra, pequeñas herramientas, accesorios y utillajes, así como los gastos generales de la empresa. Los gastos generales consisten en toda la mano de obra indirecta, materiales y otros gastos de fabricación, que no son fáciles de adjudicar a un producto directamente, como instalaciones, equipamiento, energía y servicios de fabricación como mantenimiento. Una parte de los costos generales puede ser fija y la otra varía con la tasa de producción. Las variables normalmente consideradas para la obtención de los costos de soldadura son: (2, 13, 14)

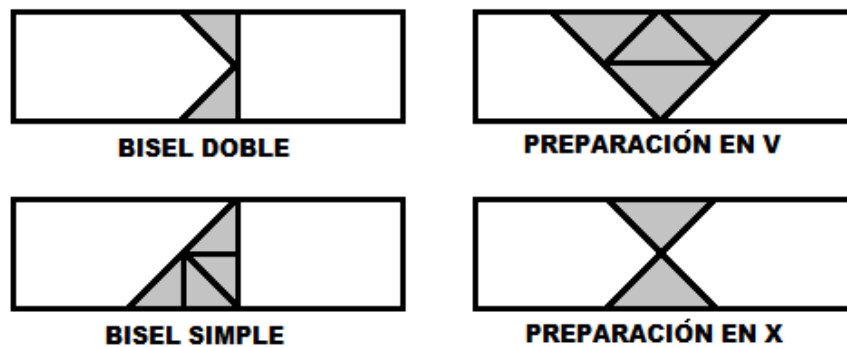
- Electrodo o varilla (tipo y tamaño).
- Rendimiento de deposición del electrodo.
- Tipo de unión y soldadura.
- Dimensiones de la soldadura.
- Tipo de protección.
- Caudal del gas protector.
- Consumo del fundente.
- Corriente y tensión del arco de soldadura.
- Rendimiento de la fuente de energía.
- Tiempo de soldadura y ciclo de trabajo.
- Proceso de soldadura.
- Costo de la mano de obra.
- Gastos generales.
- Costo preparación de bordes y posicionamiento.
- Costos de acabado de la soldadura.

➤ Costo de inspección.

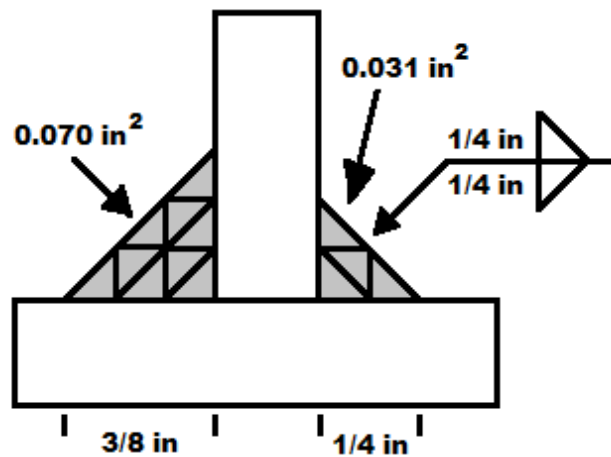
Durante el diseño de las uniones soldadas se debe tener en cuenta el área de las secciones transversales de las soldaduras, para poderlas disminuir y bajar los costos de producción, sin olvidar las condiciones de calidad. Las prácticas más comunes son realizar pequeñas separaciones en la raíz, utilizar pequeños ángulos de bisel, dejar un talón adecuado (generalmente 3 mm) y en secciones gruesas soldar por ambos lados siempre que sea posible, en lugar de soldar por un solo lado, ya que se puede disminuir un 50 % el consumo de metal de aporte. La disminución del ángulo del bisel en una preparación en V de 90° a 60° produce una reducción del 40 % en el material de aporte. Se debe resaltar que no se debe disminuir de 60° el ángulo de preparación del bisel porque se tienen problemas con la aplicación del cordón de soldadura, lo cual disminuye la calidad de la unión soldada, aunque los ángulos de preparación y separación de raíz varían en función del proceso de soldadura utilizado y del metal a soldar, en la figura 1.4 se puede ver el efecto del diseño del bisel y cantidad de material requerido para hacer el cordón de soldadura. Los soldadores generalmente creen que un exceso en el refuerzo o un aumento de metal de aporte harán más resistente la unión, lo cual en ocasiones producen más problemas. Un incremento en la dimensión específica del cordón de soldadura de filete de 1/8 in, en una soldadura de 1/4 in, supone un aumento de más del 100 % en la cantidad de metal de soldadura necesario, esto se puede ver en la figura 1.4.b. (2, 13, 14).

El ciclo de trabajo o factor de operación en soldadura, es el porcentaje de tiempo real de aplicación del cordón de soldadura durante un tiempo establecido, este tiempo puede ser en minutos, horas o jornadas de trabajo. Cuanto mayor sea el porcentaje del tiempo de aplicación del cordón de soldadura (ciclo de trabajo), mayor será la cantidad de metal de soldadura depositado y más elevado el rendimiento de la operación de soldadura. El soldador y/o operario de soldadura deberá hacer actividades como limpieza de las piezas, posicionamiento, punteado, limpieza de escoria entre otras, y serán causa de una disminución del ciclo de trabajo. El ciclo de trabajo es un parámetro que debe ser siempre lo más alto posible, para aumentar la productividad de la empresa. El soldador es el que

determina el aspecto y la calidad de la soldadura, por lo tanto cualquier obstáculo que le moleste durante su actividad debe ser eliminado. El trabajo se debe planificar y posicionar para disminuir al máximo el esfuerzo físico y aumentar la seguridad, así como el confort durante la operación de soldadura. El cambio de posición de vertical o sobre cabeza a la posición plana, aumenta significativamente la velocidad de deposición de soldadura, además una inclinación de 10° en la posición plana puede incrementar la velocidad de deposición de soldadura hasta un 50 %.



a) Efecto del diseño sobre las necesidades de material de aportación



b) Efecto del exceso de metal de aporte en una soldadura en ángulo

Figura 1.4. Efecto del diseño y el exceso de metal en la soldadura (2, 13, 14)

El ciclo de trabajo aumenta si se utilizan posicionadores y accesorios, así como procesos de soldadura semi-automáticos o automáticos, en donde el soldador u operario de soldadura no debe efectuar labores como limpieza de escoria y cambios de electrodos; un estimativo de

los ciclos de trabajo son: para soldadura manual del 5 % al 30 %, soldadura semi-automática del 10 % al 60 %, soldadura mecanizada del 40 % al 90 % y para soldadura automática del 50 % al 95 %. Un soldador puede emplear el 50 % de su tiempo en la preparación del trabajo, por tal motivo resulta económico proporcionar un ayudante al soldador para que le prepare el trabajo, ya que el ayudante puede situar las piezas, puntear y retirar escoria mientras el soldador está soldando en otro lugar; lo anterior puede doblar la producción y aumentando el ciclo de trabajo del soldador (2).

En cuanto a los costos de soldadura en donde se necesita depositar material de aportación, la cantidad de metal depositado puede ser la base para la determinación de los costos de los materiales. Estos costos reflejan el rendimiento de deposición, que es la relación entre el peso de metal de soldadura depositado y el peso del consumible empleado. El rendimiento de deposición disminuye como resultado de pérdidas, tales como colillas de electrodos, vaporización de metales por el arco, transformación en escoria de algunos componentes del electrodo o hilo tubular, salpicaduras, entre otras (2). En la tabla 1.1, están los rendimientos de deposición típicos para diferentes electrodos y procesos.

Tabla 1.1. Rendimientos de deposición típicos para diferentes electrodos y procesos (2, 13-16)

Electrodos revestidos	Rendimientos de deposición
350 mm de longitud	55 % al 65 %
450 mm de longitud	60 % al 70 %
700 mm de longitud	65 % al 75 %
Hilo macizo desnudo	Rendimientos de deposición
Arco sumergido	95 % al 99 %
GMAW	90 % al 95 %
Electroescoria	95 % al 99 %
GTAW	95 % al 99 %
Hilo tubular FCAW	80 % al 85 %

1.2.2. Indicadores de productividad en la soldadura

Para lograr aumentos en la productividad en el proceso de soldadura es necesario revisar y atender aspectos como la reducción del tiempo de arco por junta soldada, reducción de desperdicios (consumibles de soldadura, material de aporte etc.), reproceso y rechazos, y la reducción de tiempos muertos. Para lograr lo anterior, hay que seleccionar procesos de soldadura que tengan mayores valores de tasa de deposición, más eficiencia de deposición y así el factor de operación tendrán un mayor potencial para lograr un incremento en la productividad. La productividad es la relación entre la producción y los insumos necesarios para conseguir la misma. (Productividad = Costos de producción / Costos de insumos). La estrategia para incrementar la productividad de un proceso consiste en disminuir el costo de producción; sin embargo es necesario tener en cuenta que cada insumo tiene un peso (ponderación) dentro del costo total de producción de un producto dado. Es necesario tener claro que la productividad no es una medida de la cantidad de piezas que se ha fabricado, sino una medida de lo bien que se han combinado y utilizado los recursos para cumplir los resultados específicos deseables. A menudo se hace uso de medidas parciales de productividad que son empleadas para el control de la producción y como referencia para la comparación entre procesos; estas medidas parciales se conocen como indicadores de productividad. Sin embargo, un indicador por sí solo no es suficiente para establecer que un proceso o método de producción es más eficaz, ya que no toma en cuenta todos los insumos empleados para la producción. Además los insumos deben ser llevados a una misma unidad de medida para que la productividad sea consistente. Algunos de los indicadores de productividad son la tasa de deposición, el factor de operación y la eficiencia de deposición (15, 16).

* **Tasa de deposición:** Para calcular el costo de una soldadura es importante conocer la velocidad con que el metal de soldadura es depositado en una junta en la unidad de tiempo, también llamada **velocidad de deposición**, la cual generalmente se expresa en kilogramos por hora. Esta medición se calcula con base en el tiempo de arco, es decir, sin incluir paros para cambio de electrodo, limpieza de escoria, finalización de la soldadura u otras

actividades. La velocidad de deposición depende fundamentalmente de la intensidad de corriente utilizada, la cual, en la mayoría de los procesos, está directamente relacionada con el diámetro del alambre o electrodo utilizado y el tipo de gas de protección. En el caso del proceso de soldadura TIG, donde la adición de material de aporte es exterior al circuito eléctrico establecido, esta velocidad depende también de la rapidez con que el soldador efectúa dicha adición. En la tabla 1.2, están las velocidades de deposición para varios procesos de soldadura, donde se observa que es importante la incidencia del gas protector utilizado, en la soldadura semiautomática (15, 16).

* **Factor de operación o ciclo de trabajo:** Es el porcentaje del tiempo total de trabajo, que un soldador realmente utiliza para soldar. En otras palabras, es el tiempo que está encendido el arco dividido por el tiempo total trabajado. En todo trabajo de soldadura, una buena parte del tiempo involucrado en él se pierde en tareas secundarias tales como presentación y preparación de las juntas, posicionamiento de componentes, limpieza del cordón depositado, despunte del alambre, pulido del cordón y cambio de electrodo, entre otras, las cuales prolongan considerablemente el trabajo de soldadura (15, 16).

* **Eficiencia de deposición:** Es la relación del peso del material depositado en kg y el peso en kg del electrodo o el alambre consumido para hacer una soldadura, incluido los descartes de cada proceso (colas en electrodos revestidos, extremos de alambre no consumidos en procesos semiautomáticos). (Eficiencia de deposición = $\text{Peso de metal depositado} / \text{Peso de los electrodos consumidos}$). Para electrodos revestidos la eficiencia de deposición tal como es definida por la asociación americana de soldadura (AWS) y la que se reporta en la literatura no considera la pérdida por las colillas, debido a que el tamaño de las colillas puede ser variable. Sin embargo, desde el punto de vista de los costos de soldadura es necesario considerar para la eficiencia de deposición las pérdidas en las colillas ya que éstas constituyen un desperdicio real de material de aporte que tiene un costo que puede llegar a ser significativo (15, 16, 17). En la tabla 1.1 se presentaron los rendimientos de deposición típicos para diferentes electrodos y procesos.

Tabla 1.2. Velocidades de deposición en kg/h, para varios procesos de soldadura (15, 16)

Proceso	Electrodo	Corriente (A)					
		150	200	250	300	400	
SMAW	E6010, E7014	1,5	1,8	2,25	2,92	4,05	
	E6011, E6012, E6013	1,12	1,5	2,02	2,47	3,37	
	E7018	1,57	2,02	2,7	3,15	4,5	
	E7024	1,57	2,25	2,92	3,6	4,95	
	E7028	1,57	2,47	3,37	4,27	6,3	
GTAW	0,23 a 0,9 Kg/h dependiendo de la velocidad de adición de varilla						
	Gas	ϕ mm	Corriente (A)				
			100	200	300	400	500
GMAW	Argón (Ar)	0,8	1,30	2,25			
		1,2	1,30	2,47	3,15		
		1,6	1,35	2,92	3,60	4,50	5,85
		2,4		3,35	4,50	5,17	6,7
		3,2			5,17	6,30	8,1
	Dióxido de Carbono (CO ₂)	0,8	0,9	1,8			
		1,2	0,9	2,25	2,50	3,37	
		1,6	1,2	3,00	2,70	3,6	4,50
		2,4		3,25	4,0	5,1	5,8
		3,2			4,1	6,7	9,4
	Gas	ϕ mm	Corriente (A)				
FCAW	Dióxido de Carbono (CO ₂)		200	300	400	500	600
		1,2	2,40	3,50			
		1,6	3,40	4,00	4,95		
		2,4		5,17	6,52	8,10	
		3,2		7,2	7,65	9,00	10,3
		ϕ mm	Corriente (A)				
SAW	L = 1 in		300	400	500	600	700
		1,6	2,56	3,55	4,72		
		2,4	2,97	3,82	5,04	6,21	
		3,2	3,75	4,27	5,22	6,61	7,80
		4,0		5,76	5,8	6,75	8,23
		5,0			8,4	7,78	8,50

Nota: Flujo de gas (m³/h): Argón (Ar): 0,42 – 1,12 para GMAW y 0,28 – 0,7 para GTAW; Dióxido de carbono (CO₂) 0,84 – 1,40. Diámetro del alambre en milímetros (ϕ mm).

Los costos de la mano de obra se basan en el precio que se paga al trabajador, algunas veces a los trabajadores se les paga por el número de piezas producidas por hora o jornada de trabajo. A los trabajadores que cobran por horas, se requieren ciertos datos normalizados de tiempos de soldadura establecidos en (cm/ min), u otras unidades. Los tiempos se toman en el sitio de trabajo para determinar sus valores más razonables. Otras fuentes de estos datos son el procedimiento de soldadura y el diseño de la unión. El procedimiento de soldadura indica las variables del proceso como velocidad de deposición, tamaño y dimensión del electrodo. El diseño de la unión determina el número de pasadas, dimensiones de la soldadura y cantidad de metal de soldadura a depositar. Los datos se modifican en función del ciclo de trabajo que se espera. Los costos de la mano de obra, para soldadura manual o mecanizada, pueden expresarse como costo por unidad de longitud de soldadura. La siguiente fórmula puede calcular el costo de la mano de obra (2, 13, 14).

$$MO = \frac{CS * MD}{VD * CT} \quad (1.1)$$

Dónde: MO= Costo de mano de obra (pesos/centímetro).

CS= Costo del soldador (pesos/hora).

MD= Metal depositado (kg/cm).

VD= Velocidad de deposición (kg/h).

CT= Ciclo de trabajo (valor en decimales).

El costo del soldador es el costo por hora, más los costos indirectos como seguro, prima, vacaciones, entre otros. El peso del metal depositado puede determinarse mediante soldaduras de prueba o ser calculado con el área de la sección transversal del cordón de soldadura (cm²), multiplicada por la densidad del metal depositado (kg/cm³) y dividir este valor por el rendimiento de deposición. Para el refuerzo de la cara de la soldadura se puede estimar un aumento del 10 % para soldaduras en V y un 20 % para soldaduras en ángulo (2).

1.2.3. Cálculo de los costos de soldadura

Para el cálculo de la productividad, se deben medir las variables del proceso como peso del material de aporte consumido, peso de fundentes, tiempo de elaboración de la junta, consumo de energía eléctrica y consumo de gases de protección. Además hay que conocer el costo y la cantidad de los insumos empleados para realizar las soldaduras de acuerdo al WPS. También se requiere medir variables como el tiempo de arco, tiempos muertos (tiempo de cambio de electrodo, tiempo de limpieza -remoción de escoria más limpieza final-, giro de la junta), peso de las colillas y peso de material depositado. Se debe conocer el **costo de la mano de obra directa** que es el costo pagado por hora; a los soldadores y ayudantes directamente relacionados con el trabajo. No olvidar los **costos indirectos** que engloban los gastos que indirectamente inciden en el costo final del trabajo a realizar, incluyendo la mano de obra indirecta, amortización de equipos, costo de materiales, seguros, fletes, etc. Por lo tanto, se le asignará a cada uno de los términos necesarios para el cálculo de los distintos costos, una letra según el siguiente listado: (15, 16, 17)

G: costo del gas protector utilizado, en $\$/m^3$.

F: velocidad de flujo del gas protector, en m^3/h .

D: velocidad de deposición, en kg/h .

E: costo de la energía eléctrica, en $\$/Kwh$.

U: tensión de trabajo utilizada, en Volts.

I: intensidad de corriente utilizada, en Amperios.

M: costo del material de aporte en $\$/kg$.

C: costo de la mano de obra directa, en $\$/h$.

A: costos indirectos, en $\$/h$.

B: rendimiento o factor operativo del proceso utilizado, en %.

J: rendimiento del material de aporte o eficiencia de deposición, en %.

N: peso del material apenado por metro de junta, en kg/m.

L: longitud total a soldar, en m.

P: peso total de material a aportar, en kg.

S: sección de la junta a soldar, en mm²

* Cálculos

A continuación se darán las fórmulas para determinar el costo de la soldadura.

a) Costo del gas protector por kg de metal depositado:

$$\frac{G * F}{D} = a \left(\frac{\$}{Kg} \right) \quad (1.2)$$

b) Costo de la energía por Kg de metal depositado:

$$\frac{E * U * I}{1000 D} = b \left(\frac{\$}{Kg} \right) \quad (1.3)$$

c) Costo del material de aporte por kg de metal depositado:

$$\frac{M}{J} = c \left(\frac{\$}{Kg} \right) \quad (1.4)$$

d) Costo de la mano de obra directa por kg de metal depositado:

$$\frac{C}{D * B} = d \left(\frac{\$}{Kg} \right) \quad (1.5)$$

e) Costos indirectos por kg de metal depositado:

$$\frac{A}{D * B} = e \left(\frac{\$}{Kg} \right) \quad (1.6)$$

f) Costo total por kg de metal depositado:

$$a + b + c + d + e = f \left(\frac{\$}{Kg} \right) \quad (1.7)$$

g) Costo total por metro de junta:

$$f * N = g \left(\frac{\$}{Kg} \right) \quad (1.8)$$

h) Costo total del trabajo:

$$f * P = g * L = h(\$) \quad (1.9)$$

1.2.3.1. Cálculo de consumo de material de aporte

La base del cálculo de consumo del material de aporte necesario para llenar la junta es la sección transversal de dicha junta. De acuerdo al tamaño y la exactitud con que se calcule dicha sección se tendrá un error mayor o menor en el cálculo del material a aportar. El valor de la sección transversal (S), dependerá del tipo de junta y chaflán a utilizar. Por lo tanto, el cálculo puede hacerse sumamente tedioso en el caso de juntas muy complicadas. Puede simplificarse el mismo dividiendo la sección en figuras geométricas sencillas, cuyas

superficies multiplicadas por la densidad del material, permiten tabular el peso por metro de material a aportar en cada sección parcial, las cuales, por suma, permitirán obtener el peso total del material a aportar. Se calcularán las secciones más sencillas para juntas o tope y de filete y se tabularán seguidamente los pesos (kg) por metro, para distintas dimensiones de las figuras geométricas necesarias (16). En la figura 1.5, se observa cómo se calcula la sección de soldadura de acuerdo con la preparación del bisel o chaflán.

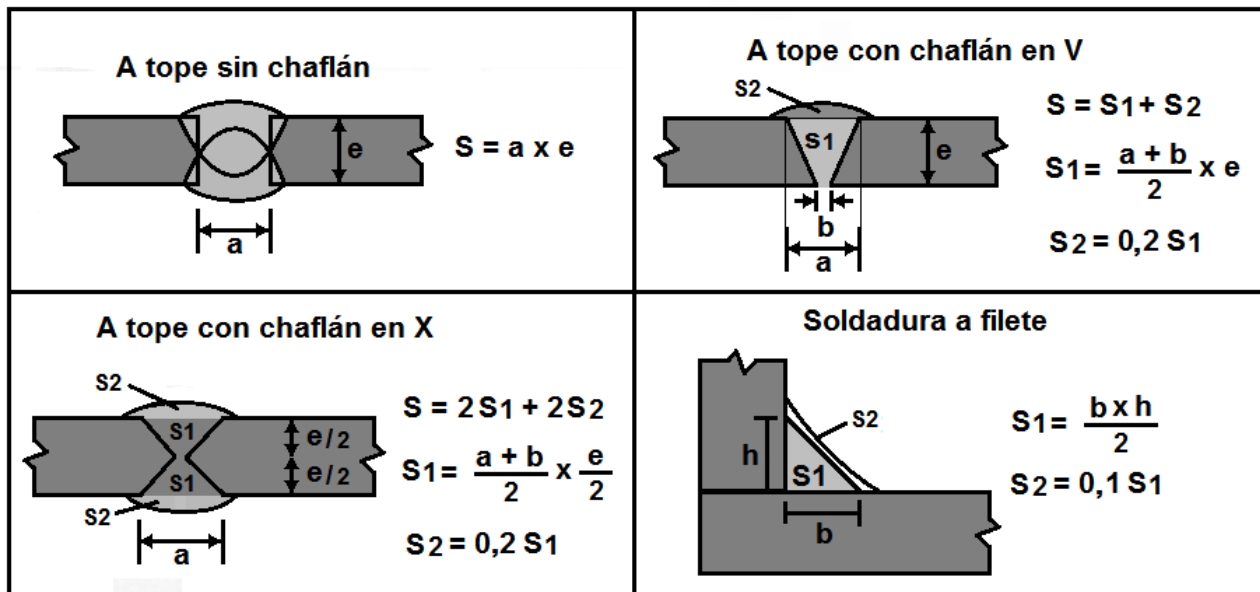


Figura 1.5. Cálculo de la sección de soldadura de acuerdo al chaflán o bisel (15)

En soldaduras a tope con chaflán en U o en doble U, no es posible dar una sola fórmula para calcular la sección, por tal motivo muchas veces se disminuye un 10 % o un 20 %, para chaflanes en V y en X respectivamente. Una vez calculada la sección de soldadura, se podrán calcular el peso del material aportado y el peso de material consumido, teniendo en cuenta de que las unidades sean consistentes.

Peso del material aportado por metro de junta

$$N = S * \delta \left(\frac{\text{Kg}}{m} \right) \quad (1.10)$$

Donde δ es la densidad del material de aporte

Peso total de material a aportar en el cordón de soldadura

$$P = N * L(\text{Kg}) \quad (1.11)$$

Peso de consumibles necesario para aportar P (kg.)

$$Pc = \frac{P}{J}(\text{Kg}) \quad (1.12)$$

En el caso del proceso SAW el valor Pc corresponde a la cantidad de alambre necesario y habrá que adicionarle el fundente a utilizar en la mayoría de los casos se consume aproximadamente 1.5 kg de fundente por cada kg de alambre.

Tiempo requerido para efectuar el trabajo

$$T = \frac{P}{D * B}(h) \quad (1.13)$$

2. GENERALIDADES DE MATERIALES DE INGENIERÍA

En este capítulo se quiere hacer un repaso de los fundamentos de materiales de ingeniería, ya que se requiere de este conocimiento para comprender los fenómenos que ocurren durante la soldadura de los materiales, debido a que durante la soldadura se cambia la estructura física de estos materiales, conllevando a cambios en sus propiedades mecánicas. La comprensión de los enlaces químicos, microestructura y transformaciones en estado sólido y líquido darán un mejor control del proceso de soldadura, aumentando la soldabilidad de los materiales para los diferentes procesos de soldeo.

La importancia de los materiales en nuestra vida cotidiana es mayor de lo que realmente se cree, ya que hacemos uso de ellos en el vestido, alimentos, recreación, vivienda y transporte entre otros. El desarrollo y evolución de las sociedades ha estado ligado a la mejora de los materiales y los procesos de fabricación, a los cuales se les pide que tengan mejores propiedades mecánicas, que sean menos densos (poco peso), más económicos y que sean amigables con el medio ambiente. El hombre avanzó en técnicas como los tratamientos térmicos, termoquímicos y adición de sustancias entre otras para producir materiales con mejores propiedades. Estos cambios tecnológicos están asociados a mejoras en el diseño, fabricación y uso de materiales alternativos o procesos de manufactura para adquirir las propiedades deseadas. De ahí que el comportamiento y funcionamiento de una pieza o producto dependa principalmente del material usado y de su proceso de fabricación. Lo anterior conllevó al estudio de los materiales para comprender la relación entre los elementos estructurales de los materiales y sus propiedades. El avance en la comprensión de un material, casi siempre está asociado al desarrollo de un avance tecnológico, como es el caso de los semiconductores y el avance de la microelectrónica. Los profesionales en soldadura deben trabajar con materiales y deben conocer de procesos de manufactura, diseño y construcción de componentes y estructuras, además deben seleccionar los materiales a utilizar y analizar las posibles fallas que puedan tener de acuerdo con el uso.

También deben manejar tolerancias dimensionales y que mantengan la forma correcta durante su uso y que sea compatible con otras partes en un posible ensamble (18, 19). Las propiedades de los materiales se pueden agrupar en seis categorías: mecánicas, químicas, térmicas, eléctricas, magnéticas y ópticas. Las propiedades mecánicas están relacionadas con el comportamiento bajo la acción de la fuerza aplicada. Las propiedades eléctricas involucran el estímulo de un campo eléctrico y su respuesta como conductividad eléctrica y constante dieléctrica; las propiedades magnéticas se refieren a la respuesta de un material frente a la influencia de un campo magnético; las propiedades ópticas relaciona la radiación electromagnética o lumínica con el índice de refracción y la reflectividad entre otras y las propiedades químicas indican la reactividad que tienen los materiales con el medio que los rodea (19, 20). La producción de nuevos materiales y el procesamiento de estos, hasta convertirlos en productos terminados, constituyen una parte importante de la economía actual. Para lograr lo anterior, se debe tener conocimiento de la estructura interna y sus propiedades, de modo que sean capaces de seleccionar el más adecuado para cada aplicación y también para desarrollar los mejores métodos de procesado. La tecnología en el estudio de materiales avanza continuamente. Por ejemplo los ingenieros mecánicos buscan materiales para altas temperaturas, de modo que los motores de reacción puedan funcionar más eficientemente. Los ingenieros eléctricos procuran encontrar nuevos materiales para conseguir que los dispositivos electrónicos puedan operar a mayores velocidades y temperaturas, etc. La ciencia de los materiales y la metalurgia trata sobre la estructura interna de los materiales y las relaciones entre las estructuras y las propiedades que exhiben los materiales. Cuando se refiere a la metalurgia de la soldadura, concierne a los distintos cambios que ocurren (transformaciones metalúrgicas) en los metales cuando se unen por soldadura, especialmente aquellos que afectan las propiedades mecánicas como dureza, ductilidad, tenacidad resistencia a la tensión, fatiga entre otras (20, 21).

2.1. Clasificación de materiales

La ciencia e ingeniería de materiales puede clasificar los materiales de diferentes maneras, cada una obedece una necesidad, aplicación, origen o propiedades. Con el fin de mostrar un

panorama enriquecedor del área de los materiales se mencionarán las clasificaciones más usadas de los mismos: (19, 20)

1. Clasificación de los materiales según su origen: materiales naturales (proporcionado por la naturaleza sin alteraciones de ningún tipo: madera, hueso, cuero, etc.) o materiales sintéticos o artificiales (tienen que pasar por un proceso de fabricación; ya que son creados por personas: plástico, vidrio, metales, aleaciones con memoria, etc.).
2. Clasificación de los materiales según su estructura: materiales cristalinos (los átomos que lo conforman se encuentran ordenados de forma periódica: oro, cobre) y materiales amorfos (los átomos que lo conforman no se encuentran ordenados de forma periódica: vidrio, ladrillo entre otros).
3. Clasificación de los materiales según propiedades: Esta es la clasificación más usada para los materiales y los divide en cuatro grupos; metales, cerámicos, polímeros y compuestos. A continuación se hace un resumen de las principales características de materiales y en la figura 2.1 se puede observar un esquema de la clasificación de los materiales.

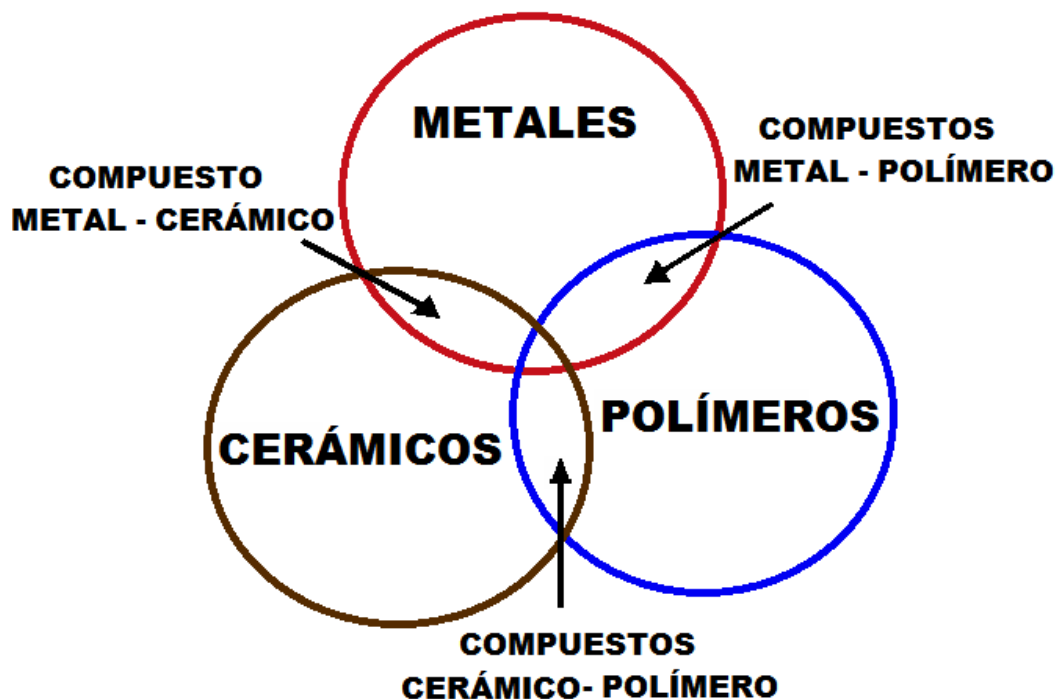


Figura 2.1 Clasificación de los materiales de ingeniería

2.1.1. Materiales metálicos

Los metales son sustancias inorgánicas cuya estructura fundamental está compuestas de uno o más elementos metálicos como hierro, cobre, aluminio, cinc, níquel, entre otros, pudiendo contener también algunos elementos no metálicos como el carbono y el flúor entre otros. Las aleaciones son mezclas de metales que están compuestas en su estructura por uno o más elementos metálicos y en algunas ocasiones por elementos no metálicos como el carbono. Los metales se caracterizan por tener enlace metálico, que influye en muchas de sus propiedades como la elevada conductividad térmica y eléctrica, considerable resistencia mecánica, alta rigidez, muy buena ductilidad y resistencia al impacto, elevada maleabilidad y reciclabilidad, ya que se pueden fundir y reutilizar (19-21).

Son muy útiles en aplicaciones estructurales o de carga y generalmente se utilizan en aleaciones, para alcanzar ciertas propiedades deseadas a partir de la obtención de microestructuras adecuadas, aunque en ocasiones se utilizan en forma pura como en el caso del cobre electrolítico. Los metales y aleaciones se subdividen en dos grupos: los ferrosos y los no ferrosos.

Metales ferrosos: Son aquellos que se basan en el hierro, siendo el hierro su principal elemento de aleación. Este subgrupo incluye el acero y las fundiciones o hierros colados. El acero es una aleación de hierro y carbono, con un porcentaje de carbono entre 0,02 % y 2 %, además de otros elementos de aleación. A nivel de ingeniería, el acero tiene múltiples aplicaciones como perfiles estructurales, vigas, clavos tornillos, alambres, utensilios de cocina, partes de automóviles, etc. Los cuales son ampliamente utilizadas en los más variados ambientes, además de ser relativamente baratos. Las fundiciones son aleaciones de hierro, carbono y silicio, caracterizándose por tener un mayor contenido de carbono entre el 2 % y 6,67 %, además se encuentra silicio entre un 0,5 % y 3 %, aunque las fundiciones blancas no tienen silicio. Las aplicaciones más comunes de las fundiciones se encuentran en bloques de motores, bases de máquinas herramientas como en tornos y fresadoras, cuerpos de válvulas, engranajes, cigüeñales, etc. (18, 20).

Metales no ferrosos: Son todos los metales y aleaciones que no tienen como base en su composición química el hierro. En general son blandos y tienen baja resistencia mecánica. Ejemplo de estos son el aluminio, níquel, plata, zinc, plomo, titanio y sus aleaciones entre otros. Los metales no ferrosos se clasifican en tres grupos: **Pesados:** son aquellos cuya densidad es igual o mayor de 5 kg/dm^3 , algunos de ellos son el níquel, tungsteno, plomo cobalto, cobre entre otros. **Ligeros:** aquellos cuya densidad está comprendida entre 2 y 5 kg/dm^3 , algunos de ellos son el aluminio y el titanio entre otros. **Ultraligeros:** aquellos cuya densidad es menor de 2 kg/dm^3 , algunos de ellos son el magnesio y el berilio entre otros.

2.1.2. Materiales cerámicos

Son materiales inorgánicos, constituidos por la unión de un metal y un no metal, poseen enlaces iónico y/o covalente que le dan algunas propiedades características como resistencias a altas temperaturas, alta dureza, aislantes térmicos y eléctricos en su gran mayoría, baja resistencia al choque térmico, resistentes a la compresión aunque sus propiedades mecánicas generalmente son inferiores a las de un metal. De acuerdo con el tipo de materia prima utilizada, al proceso de conformación y a la aplicación, los materiales cerámicos pueden ser divididos en cerámicos tradicionales y cerámicas avanzadas o de ingeniería (19, 22).

Cerámicos tradicionales: Su composición es básicamente sílice, arcillas y feldespatos. Entre los artículos posibles de fabricar esta la alfarería, ladrillos, pisos, baldosas y tejas en la industria de la construcción y porcelanas eléctricas, entre otras aplicaciones. Para su construcción se utilizan métodos artesanales y las piezas obtenidas son porosas, coloreadas y cocidas a bajas temperaturas.

Cerámicas avanzadas o de ingeniería: Está conformando por un grupo de materiales sintéticos denominado cerámicas funcionales, cuya característica es la alta pureza de las materias primas y la alta tecnología de fabricación, que le confieren a la pieza terminada

excelentes propiedades como: dureza, tenacidad, alta densidad, resistencia a la abrasión, resistencia a la corrosión, termo-resistencia, estabilidad dimensional y características eléctricas especiales. Son aptas para la construcción de equipo y maquinaria, permitiendo el desarrollo de nueva tecnología, la cual presenta limitaciones por las características de los materiales existentes. Entre las materias primas que cumplen estas exigencias están: la alúmina, la sílice, la mullita, los óxidos de berilio, circonio, torio, titanio y molibdeno. Con 99,9 % de pureza, las cerámicas de ingeniería son obtenidas generalmente por procesos de sinterización de polvos cerámicos. También los carburos y los nitruros son apreciados por su dureza y resistencia al desgaste en las herramientas de corte (20, 22).

Las cerámicas avanzadas se pueden clasificar en dos grandes grupos; **las cerámicas estructurales** (materiales que poseen alta resistencia a la tracción, a altas temperaturas, a la deformación, a la corrosión y a la oxidación, como nitruro de silicio (Si_3N_4), carburo de silicio (SiC), circonita (Zr_2SiO_4), alumina (Al_2O_3), y mullita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) entre otras) y **las cerámicas funcionales**, que pueden ser electrónicas (aislantes o dieléctricos, piezoeléctricos, conductores y semiconductores y superconductores), magnéticas u ópticas.

2.1.3. Materiales poliméricos

Los polímeros son macromoléculas generalmente orgánicas, compuestas por una o varias unidades químicas (monómeros o meros) que se repiten a lo largo de toda la cadena, las cuales se unen por enlaces covalentes; sin embargo un polímero puede tener enlaces de tipo iónico. Los polímeros forman largas cadenas que se unen entre sí por enlaces secundarios como las fuerzas de Van der Waals, interacciones dipolo-dipolo, puentes de hidrogeno o interacciones hidrofóbicas. La obtención de los polímeros se realiza a través de un proceso denominado “polimerización”, siendo los monómeros las unidades químicas que se repiten a lo largo de toda la cadena de un polímero, por ejemplo el monómero del polietileno es el etileno, el cual se repite x veces a lo largo de toda la cadena. Estos materiales se distinguen entre sí por su estructura, propiedades y composición. Entre las principales propiedades de los polímeros son su alta resistencia a la corrosión, buenos aislantes eléctricos, baja

resistencia mecánica, baja conductividad térmica y no son muy adecuados para ser usados a alta temperatura generalmente trabajan debajo de 200 °C. Los polímeros se emplean en innumerables aplicaciones como son: vestuario, juguetes, pinturas, adhesivos, neumáticos, empaques y biomedicina entre otros (19, 22).

Clasificación de los polímeros: Existen varias formas posibles de clasificar los polímeros, sin que sean excluyentes entre sí; una forma de clasificar los polímeros es en tres grupos: los termoplásticos, los termoestables (o termofijos) y los elastómeros (o cauchos). Cada grupo se diferencia por su estructura molecular y por el tipo de mecanismo de enlace de las moléculas (lineal o ramificado). La figura 2.2 muestra una de las clasificaciones de los plásticos de acuerdo con la configuración de sus macromoléculas.

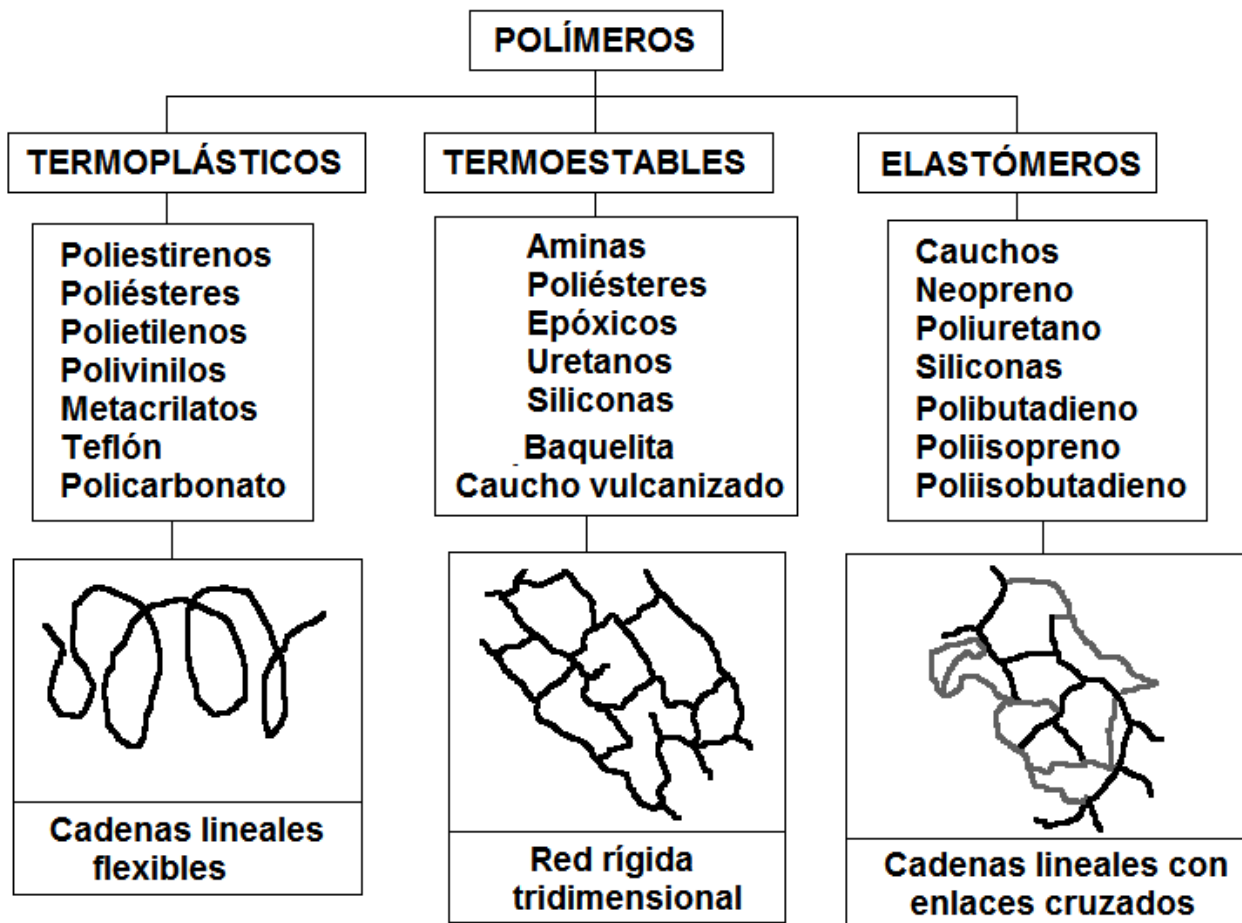


Figura 2.2. Clasificación de los polímeros según su estructura general

- **Polímeros termoplásticos:** Estos polímeros son plásticos que pueden cambiar de propiedades cuando se calientan, ya que generalmente a temperaturas superiores de 100 °C, se vuelven deformables o flexibles y si se calienta a temperatura más altas se puede fundir, pero cuando se vuelven a enfriar quedando con un acabado liso y duro. Esta característica de estos materiales permite que puedan ser reformados varias veces sin sufrir cambios significativos en sus propiedades. Los termoplásticos pueden ser conformados con la aplicación de calor para que obtengan la forma definitiva. La mayoría de los termoplásticos son polímeros de alto peso molecular y pueden tener una estructura amorfa o parcialmente cristalina. La plasticidad a alta temperatura se debe a la linealidad de las cadenas moleculares que conforman este tipo de materiales y a la capacidad que tienen las moléculas para deslizarse unas con respecto a las otras, ya que los enlaces secundarios que unen las cadenas adyacentes se rompen a altas temperaturas, facilitando el deslizamiento de estas, lo que conlleva a que ganen ductilidad a temperaturas relativamente altas (19).

- **Polímeros termoestables:** son polímeros unidos mediante enlaces químicos covalentes, con entrelazamiento transversal de cadenas, adquiriendo una estructura final altamente reticulada que los hacen infusibles e insolubles. Debido a su estructura molecular reticular, estos materiales presentan mejores características térmicas y mecánicas con respecto a los termoplásticos, aunque pueden presentar fragilidad debido a su estructura reticulada. A menudo, los polímeros termoestables se obtienen de dos resinas líquidas. Una contiene los agentes de curado, endurecedores y plastificantes; y la otra resina contiene materiales de relleno y/o reforzantes que pueden ser orgánicos o inorgánicos. Cuando se mezclan estos dos componentes, se inicia la reacción de entrecruzado, de igual modo que en otros se inicia por calor y/o presión. Debido a esto, los termoestables no pueden ser recalentados y refundidos como los termoplásticos. Esto es una desventaja pues los fragmentos producidos durante el proceso no se pueden reciclar y usar. Además, estos polímeros son materiales que después de endurecidos, permanecen rígidos y al aumentar la temperatura, las cadenas se compactan haciendo al polímero más resistente hasta el punto en que se degrada y pierde sus propiedades, por lo tanto, pueden ser utilizados a temperaturas más altas que los polímeros termoplásticos. En general, las ventajas de los plásticos termoestables para

aplicaciones en ingeniería son: alta estabilidad térmica, alta rigidez, alta estabilidad dimensional, resistencia a la termo fluencia y deformación bajo carga, peso ligero y altas propiedades de aislamiento eléctrico y térmico (19).

- **Elastómeros:** son materiales poliméricos amorfos que están compuestos por cadenas moleculares muy dobladas y plegados, que los hacen complejos; además tienen la capacidad de soportar altas deformaciones elásticas al ser sometidos a esfuerzos, ya que las cadenas sufren enderezamiento en la dirección del esfuerzo y cuando se retiran estos esfuerzos recobran nuevamente su dimensión original. Los elastómeros se encuentran sobre su temperatura de transición vítrea, de ahí esa considerable capacidad de deformación. A temperatura ambiente las gomas son relativamente blandas ($E \sim 3\text{MPa}$) y deformables. Se usan principalmente para cierres herméticos, adhesivos y partes flexibles. Entre los tipos de cauchos que se encuentran en el mercado están el Caucho natural, extraído del látex del árbol de caucho y los cauchos sintéticos. Algunos elastómeros son el poli-estireno, poli-butadieno, nitrilo, neopreno, poliuretano y silicona entre otros (19).

2.1.4. Materiales compuestos

Estos materiales surgen de la necesidad de obtener materiales con mejores propiedades y para ello se combinan dos o más materiales (metal, polímero o cerámico) para producir un nuevo material con mejores propiedades de cada uno de los materiales originales (sinergia). Generalmente están formados por una matriz reforzada por partículas o fibras. Los componentes del material compuesto no deben disolverse ni fusionarse completamente entre ellos, es decir, los materiales deben poderse identificar por medios físicos, ya que son heterogéneos. El hecho de que los materiales compuestos sean heterogéneos muchas veces hace que también sean anisotrópicos (sus propiedades dependen de la orientación del material de refuerzo), por lo que hace que sus propiedades no serán las mismas en todo su volumen. La mayoría de estos materiales son creados artificialmente aunque algunos son de origen natural como la madera y el hueso entre otros. Estos materiales tienen excelentes propiedades mecánicas, como alta rigidez específica (E/r), baja densidad, alta resistencia

dieléctrica, buena resistencia a la corrosión, buena estabilidad dimensional, tolerancia a altas temperaturas, buen comportamiento a la fatiga y bajos costos de mantenimiento. Algunas aplicaciones se realizan en bicicletas, raquetas, cascos de barco, automóviles, herramientas de corte, entre otras. Los materiales compuestos presentan algunas desventajas, como su elevado costo, respecto a otros materiales de ingeniería, pero sus mejores propiedades compensan su alto precio. (19-21) En la figura 2.3, se muestran imágenes de materiales compuestos.



(a) Tejido de fibra de carbono en matriz epoxi

(b) Patín con fibra de carbono

Figura 2.3. Materiales compuestos

2.2. Estructura atómica de los materiales

La estructura de un material se puede examinar en cuatro niveles: estructura atómica, arreglo atómico, microestructura y macroestructura. La estructura atómica influye en la forma como se unen los átomos entre sí y de la forma como se unen los átomos ayuda a clasificar a los materiales como metales, cerámicos y polímeros; la comprensión de lo anterior, permite relacionar las propiedades mecánicas y el comportamiento físico de los materiales. Las propiedades de los materiales también dependen de la disposición

geométrica de los átomos y de las interacciones que existen entre los átomos y las moléculas constituyentes, en donde la naturaleza cristalina de los materiales generalmente determina su utilidad tecnológica. Los átomos son la unidad básica estructural de todos los materiales y constan principalmente de tres partículas subatómicas básicas, protones neutrones y electrones, siendo los electrones, particularmente los de la capa externa, los que determinan las propiedades de los átomos. El átomo está formado por un núcleo rodeado de electrones, en donde el núcleo está conformado por neutrones sin carga y protones de carga positiva.

La valencia de un átomo esta relacionada con la capacidad que tiene para combinarse químicamente con otros elementos y generalmente se determina por el número de electrones en los niveles más externos, aunque la valencia también depende de la naturaleza de la reacción química. Si un átomo tiene una valencia de cero, el elemento es inerte. Otro concepto importante, es la electronegatividad, que es la tendencia de un átomo de ganar un electrón. Los átomos con los niveles externos de energía casi llenos son fuertemente electronegativos y aceptan con facilidad electrones. Los átomos con los niveles de energía casi vacíos, ceden con facilidad sus electrones y son fuertemente electropositivos. La capacidad de un átomo para ganar o perder electrones está dado por su electronegatividad, electropositividad, energía de ionización y electroafinidad.

2.2.1. Enlaces químicos

Los enlaces químicos entre los átomos se realizan con los electrones de la capa exterior, los cuales reciben el nombre de electrones de valencia. La unión consiste en que uno o más electrones de valencia, se introducen en la atmósfera electrónica de otro átomo. Todos los átomos tienen tendencia a ganar, ceder o compartir electrones para adquirir el estado estable que poseen los gases nobles, porque ésta es la estructura energéticamente más estable y con más baja energía, generando gran estabilidad química. Los gases nobles poseen ocho electrones en su última capa, salvo el helio que tiene dos (19).

Enlace iónico: Los materiales que tienen átomos metálicos y no metálicos entre sus elementos, tienen la tendencia a transferir electrones, ya que los átomos metálicos dan fácilmente sus electrones de valencia a los átomos de un no metal, que es quien recibe los electrones. En este proceso los átomos adquieren la configuración estable del gas inerte y para ello se hacen ionizar, cargándose eléctricamente. El cloruro de sodio (NaCl) es buen ejemplo, el átomo de sodio (metálico) cede un electrón (catión), quedando cargado positivamente (Na^+) y adquiere la configuración electrónica del Neón, mientras el cloro recibe el electrón (anión) y quedando cargado negativamente (Cl^-) y adquiere la configuración del argón. La atracción electrostática entre iones de carga opuesta genera el enlace iónico, el cual es típico en las sales formadas por combinación de elementos metálicos (elementos electropositivos), del extremo izquierdo de la tabla periódica, con los elementos no metálicos (elementos electronegativos), del extremo derecho. El radio iónico de una especie que ha perdido un electrón es menor que el radio atómico original, esto se debe a que los electrones que quedan son más atraídos hacia el núcleo, reduciendo su radio, por otra parte, cuando un elemento gana un electrón, su radio atómico aumenta, debido a que este electrón que entra no se encuentra tan atraído hacia el núcleo. Una representación del enlace iónico se puede ver en figura 2.4.

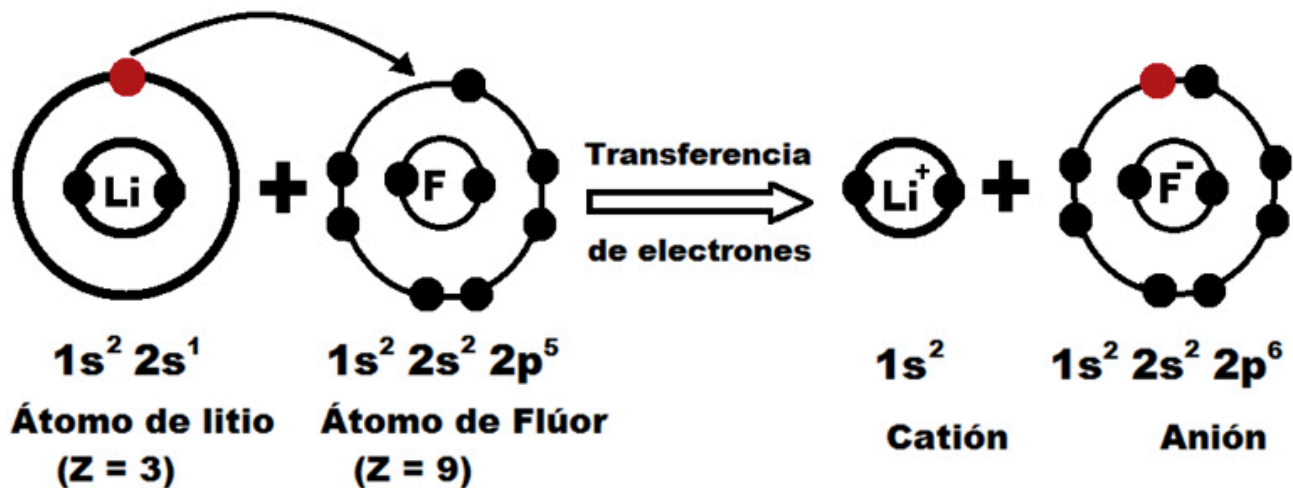


Figura 2.4. Modelo representativo del enlace iónico (19, 21)

Enlace covalente: Este tipo de enlace se produce cuando dos o más átomos se unen compartiendo uno o más pares de electrones de valencia, para alcanzar el octeto estable, excepto el hidrógeno que alcanza la estabilidad con dos electrones. Este enlace es de carácter direccional. La diferencia de electronegatividad entre los átomos no es suficientemente grande como para que se efectúe la transferencia de electrones (enlace iónico), entonces los átomos comparten electrones. Ejemplos de moléculas con enlace covalente son: HF, H₂O, NH₃, CH₄ y CF₄. La fuerza de unión es la atracción electrostática entre los electrones y los núcleos. Dentro de los enlaces covalentes encontramos dos tipos de enlaces como el enlace covalente polar y enlace covalente apolar. (18) Este tipo de enlace es representado en la figura 2.5.

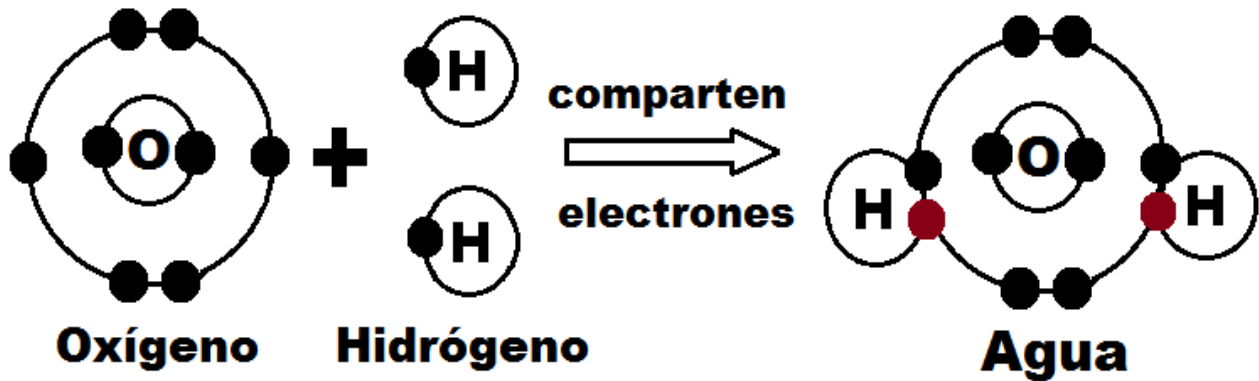


Figura 2.5. Modelo representativo del enlace covalente (19, 21)

Enlace metálico: Los metales tienen pocos electrones de valencia (1, 2 ó 3) y pierden fácilmente esos electrones, convirtiéndose en iones positivos (Na⁺, Cu²⁺, Mg²⁺); los iones positivos se ordenan en el espacio formando una red metálica y los electrones de valencia desprendidos de los átomos pasan a ser electrones “libres” y forman una nube de electrones que puede desplazarse a través de toda la red y tienen la misma probabilidad de asociarse a los átomos vecinos. De este modo, el conjunto de iones positivos del metal queda unido a la nube de electrones que tiene carga y los envuelve. Los electrones se comparten de manera no direccional. Lo anterior explica las propiedades de los metales como su alta conductividad eléctrica, térmica, ductilidad entre otras (19). Una representación del enlace metálico puede verse en la figura 2.6.

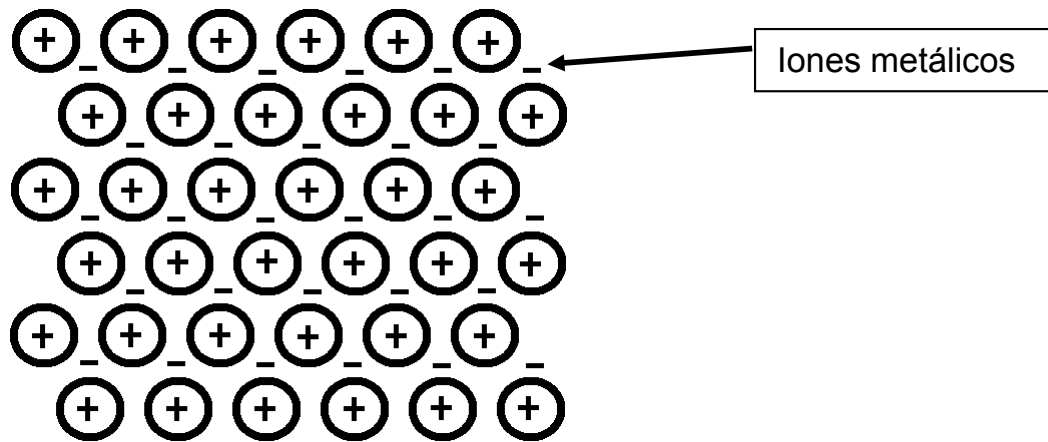


Figura 2.6. Modelo representativo del enlace metálico (nube de electrones) (19-22)

Fuerzas de Van der Waals. Son fuerzas de estabilización molecular, también conocidas como atracciones intermoleculares o de largo alcance entre molécula y molécula. Estas fuerzas son más débiles que las internas que unen la molécula y no se le puede considerar un enlace (metálico, iónico o covalente), sólo se le considera una atracción. Excepto en un gas muy disperso, las moléculas ejercen atracciones y repulsiones entre sí, generando interacciones dipolo-dipolo o fuerzas de London, que surgen como consecuencia de dipolos inducidos en una molécula por otra. En este caso los electrones de una molécula son débilmente atraídos hacia el núcleo de otra, pero entonces los electrones de esta son repelidos por los electrones de la primera. El resultado es una distribución desigual de la densidad electrónica y en consecuencia, un dipolo es inducido (Polarización). Este tipo de atracción es representado en la figura 2.7.

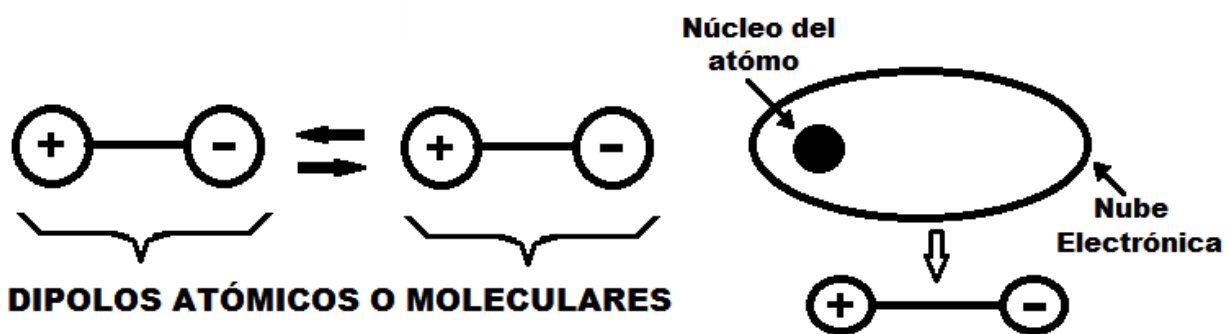


Figura 2.7. Representación de un enlace por fuerzas intermoleculares (19-21)

Los materiales tienen sus enlaces químicos preferentes, el cual condiciona las propiedades de los materiales. El tetraedro que se muestra en la figura 2.8, presenta los tipos de enlace y las familias de materiales que los comparten. Cada cara del tetraedro representa una familia de materiales y en los vértices de cada cara se ubican los enlaces que estas familias comparten. Mientras más fuerte es el tipo de enlace que presenta un material, se dice que este presenta un bajo nivel de energía. Todos los materiales tienden a estar en su mínimo estado de energía y esto depende de la distancia a la que se encuentran los átomos que forman el enlace.

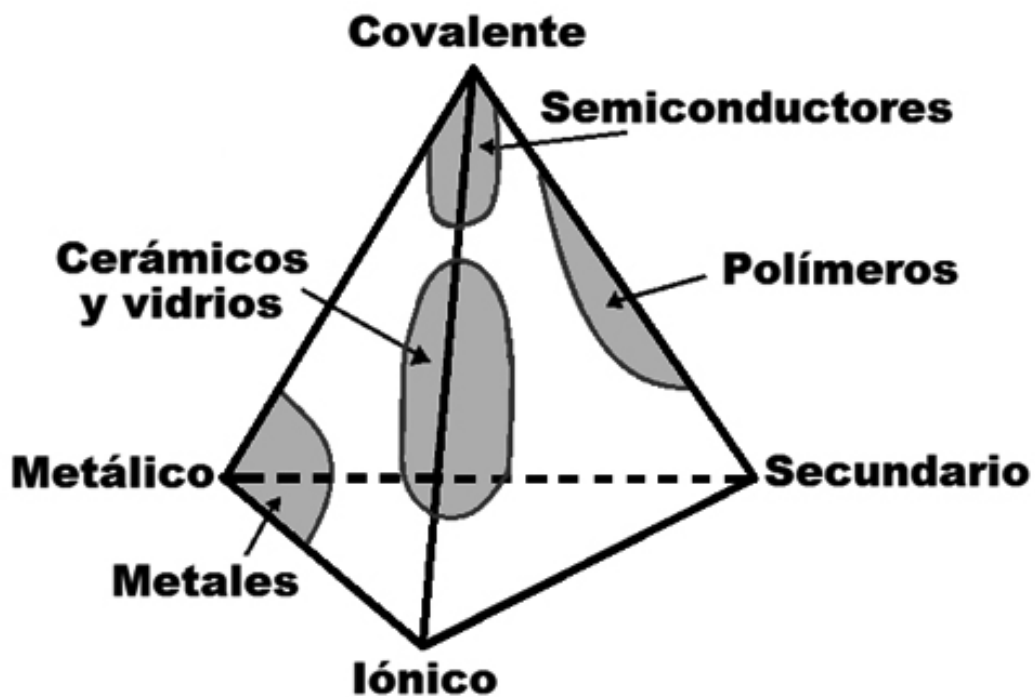


Figura 2.8. Tetraedro que relaciona diferentes familias de materiales con los enlaces químicos que se comparten (20, 22)

Los átomos experimentan fuerzas de atracción y de repulsión. Por esto, los átomos individuales mantienen su ubicación original en relación con todo el resto de los átomos. Sin embargo, no están estacionarios en esas posiciones, sino que vibran alrededor de una posición de equilibrio para mantener un espacio balanceado. A una temperatura dada se mantendrán con una separación equilibrada para dicha temperatura particular. Cuando hay un balance entre las fuerzas de repulsión y de atracción, decimos que la energía interna del metal está en un mínimo. Cualquier intento de forzar los átomos más cerca uno de otro

tendrá la oposición de fuerzas repulsivas que se incrementan en la medida que son llevados más cerca. Igualmente, cualquier intento por de separar los átomos, dará como resultado una fuerza opositora de atracción. Estas fuerzas de atracción, sin embargo, tienden a decrecer en la medida que los átomos son alejados.

2.3. Estructura de los sólidos cristalinos (organización atómica)

Los materiales sólidos se pueden clasificar según la regularidad de cómo se ubican los átomos o iones, unos respecto a otros. En un material cristalino, los átomos se sitúan en una disposición repetitiva o periódica a lo largo de muchas distancias atómicas, existiendo un orden de largo alcance, ya que siguen un patrón tridimensional repetitivo. Los metales, muchas cerámicas y algunos polímeros adquieren estructuras cristalinas en condiciones normales de solidificación. Las propiedades de los sólidos cristalinos dependen de la estructura cristalina del material, que es el ordenamiento espacial de átomos, iones y moléculas. El arreglo atómico juega un papel importante en la determinación de la microestructura y en el comportamiento de un material sólido (21). Sin considerar las imperfecciones que tienen los materiales, existen tres niveles de arreglos atómicos: **Sin orden;** los átomos no tienen orden y llenan de manera aleatoria el espacio sin seguir ningún tipo de secuencia, se trata de un material no cristalino o amorfo, un ejemplo son los gases como el helio y algunos cerámicos. **Orden de corto alcance;** los átomos tienen un arreglo espacial de unos cuantos átomos, sólo los vecinos más cercanos a dicho átomo, un ejemplo es el agua líquida. **Orden de largo alcance;** el arreglo atómico espacial se extiende por todo el material, formando un patrón repetitivo, regular en forma de rejilla o red. La red es formada por un conjunto de puntos llamados puntos de red, los cuales siguen un patrón periódico, el cual tiene un entorno de red que es idéntico. La red tiene diferentes tamaños y formas dependiendo del tamaño del átomo y del tipo de enlace entre ellos. La estructura cristalina de un material relaciona el tamaño, forma y organización atómica dentro de la red, siendo el reticulado cristalino, la disposición tridimensional de puntos coincidentes con las posiciones de los átomos (centros de las esferas), de acuerdo con el modelo atómico de esferas rígidas, en el cual las esferas representan átomos (22).

En el caso de los materiales cristalinos, se puede decir que son sólidos que poseen forma y volumen definidos, constituidos por átomos metálicos, no metálicos, iones ó moléculas. Las propiedades de los metales están relacionadas con la estructura cristalina y con el enlace químico, tales como: la densidad, dureza, punto de fusión, conductividad eléctrica y calorífica. Sin embargo, las propiedades mecánicas dependen fuertemente de la estructura, tales como: dureza, elasticidad, ductilidad, maleabilidad y resistencia a la tensión entre otras. Un ejemplo son las variedades alotrópicas del carbono como el grafito y el diamante, que están constituidos únicamente por átomos de carbono. El grafito es uno de los materiales más blandos, es opaco, suele tener color negro, es un buen lubricante en estado sólido y conduce bien la electricidad. Por otra parte, el diamante es uno de los materiales más duros que existe, es transparente, muy abrasivo y un buen aislante eléctrico. Como se ve, son dos materiales cuyas principales propiedades son antagónicas. La diferencia de propiedades está determinada por sus estructuras cristalinas (ordenamiento atómico) y la forma como se enlazan. En la figura 2.9 se puede ver las estructuras del grafito y el diamante (18, 19, 20).

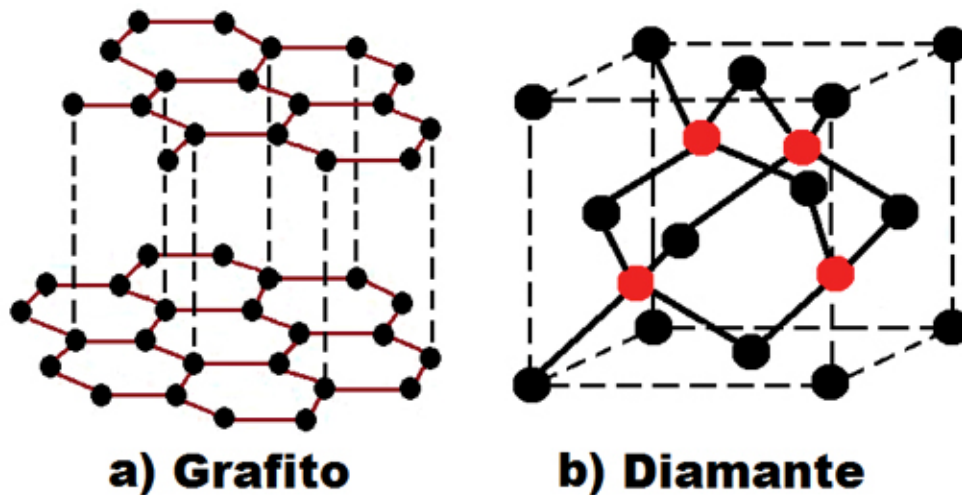


Figura 2.9. Estructuras cristalinas del grafito y el diamante (19, 20)

Los materiales tienen diferentes propiedades según sea su procesamiento, ya que un cambio de proceso puede conllevar a un cambio en la microestructura obtenida, lo cual afecta su desempeño, ya que puede cambiar las propiedades mecánicas del material o pieza.

En la figura 2.10 se observa un esquema que relaciona la estructura, propiedades, procesamiento y desempeño de los materiales, ya que un cambio en alguna de estas variables influye en los demás y una forma de saber si este proceso está conforme con lo establecido es por medio de la caracterización del material (19, 20). Los materiales que tienen más de una estructura cristalina se llaman alotrópicos para materiales puros o polimórficos para aleaciones.

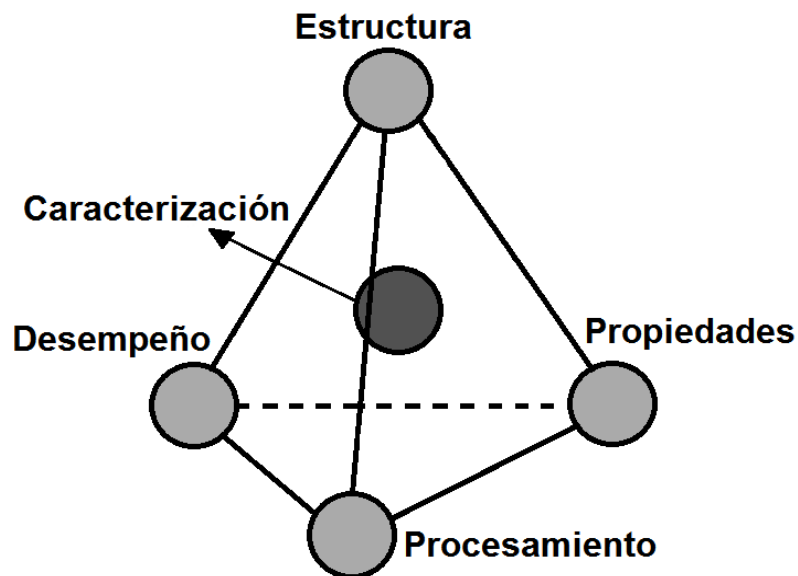


Figura 2.10. Esquema que relaciona la estructura, propiedades, procesamiento y desempeño de los materiales (19)

2.3.1. Celdas unitarias

La celda unitaria es la subdivisión de la red cristalina que sigue conservando las características generales de toda la red, ya que al apilar las celdas unitarias forman la red cristalina, por tal motivo, la celda unitaria es la unidad estructural fundamental y define la estructura cristalina mediante su geometría y por la posición de los átomos dentro de ella. Se identifican 14 tipos de celdas unitarias o redes de Bravais, agrupadas en 7 sistemas cristalinos: Cúbico, Tetragonal, Ortorrómico, Romboédrico, Hexagonal, Monoclínico y Triclínico. La mayor parte de los sistemas cristalinos presentan variaciones de la celda

unitaria básica, derivando en las 14 celdas unitarias estándar de Bravais, las cuales describen todas las estructuras reticulares posibles. Hay cuatro tipos básicos de celdas unitarias (1) Simple, (2) Centrada en el Cuerpo, (3) Centrada en las Caras, y (4) Centrada en la Base. En la figura 2.11 se observan las 14 redes de Bravais y la celda unitaria.

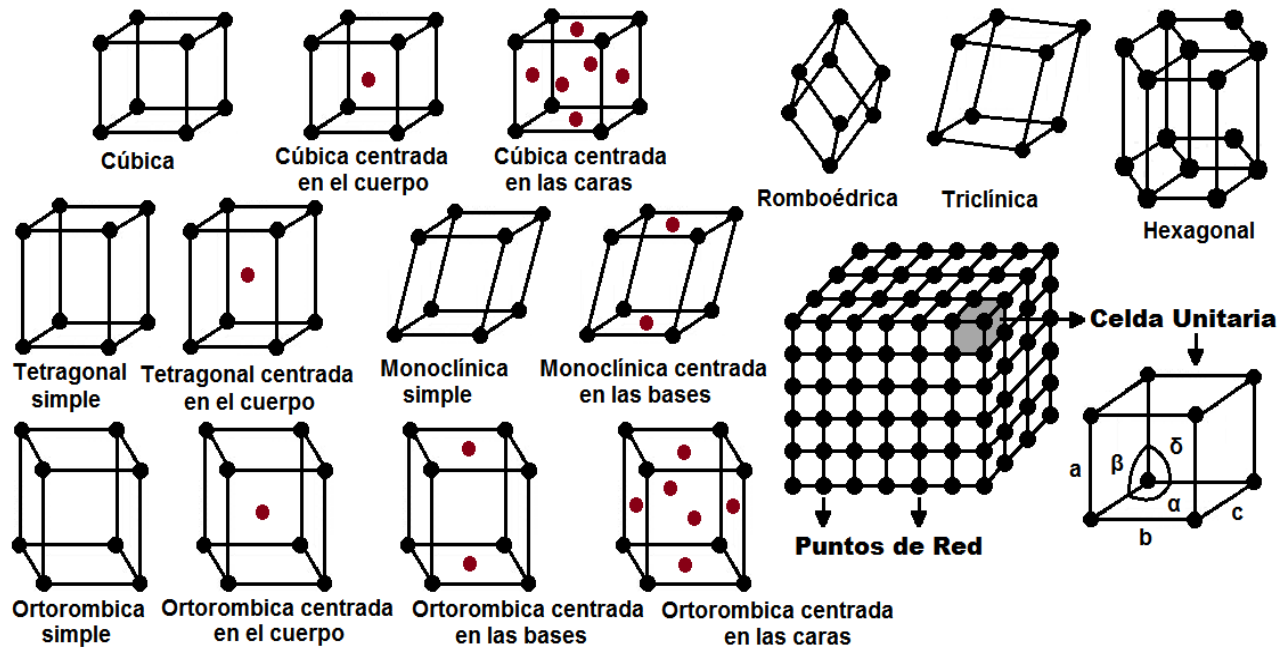


Figura 2.11. Redes de Bravais y sus sistemas (19-22)

Los parámetros de la red describen el tamaño y la forma de la celda unitaria; la geometría de la celda unitaria se define en función de seis parámetros: las longitudes axiales a , b y c y los tres ángulos inter-axiales α , β , y δ . Para identificar los diferentes planos y direcciones en un cristal se usan los índices de Miller, para planos (hkl) (en paréntesis) y para direcciones $[uvw]$ (en corchete). La ventaja del uso de los índices de Miller reside en que resulta fácil evidenciar la simetría de un cristal, además en algunos materiales las propiedades varían con la orientación cristalográfica. Los valores de los índices de Miller se determinan basándose en un sistema de coordenadas cuyo origen se sitúa en el vértice de la celda unitaria y cuyos ejes (x,y,z) coinciden con las aristas de la celda unitaria. Las celdas unitarias están definidas por un número específico de puntos de red, por ejemplo el sistema cúbico tiene un punto de red en las esquinas de las celdas y en algunas ocasiones en el

centro de la cara o centrado en el cuerpo del cubo. Se puede contar el número de puntos de red que corresponden a cada celda unitaria, identificando los puntos de red que son compartidos con otras celdas unitarias y los que no son compartidos. Un punto de red en la esquina de una celda unitaria está compartida con ocho celdas unitarias adyacentes y solo una octava parte del punto de red le corresponde a cada celda unitaria. Las esquinas contribuyen con $1/8$ de punto, las caras con $1/2$ y las posiciones centradas en el cuerpo con 1 punto (19).

Dos características importantes de la estructura cristalina son el número de coordinación y el factor de empaquetamiento atómico (FEA). El número de coordinación es el número de vecinos más cercanos que tiene el átomo; el número de coordinación es una indicación del empaquetamiento atómico; para la estructura cúbica centrada en las caras el número de coordinación es 12. El factor de empaquetamiento es la fracción de espacio ocupado por átomos, suponiendo que los átomos son esferas rígidas, donde;

$$FEA = \frac{(\# \text{ átomos / celda}) * (\text{Volumen de cada átomo})}{\text{Volumen celda}} \quad (2.1)$$

2.3.2. Principales estructuras cristalinas metálicas

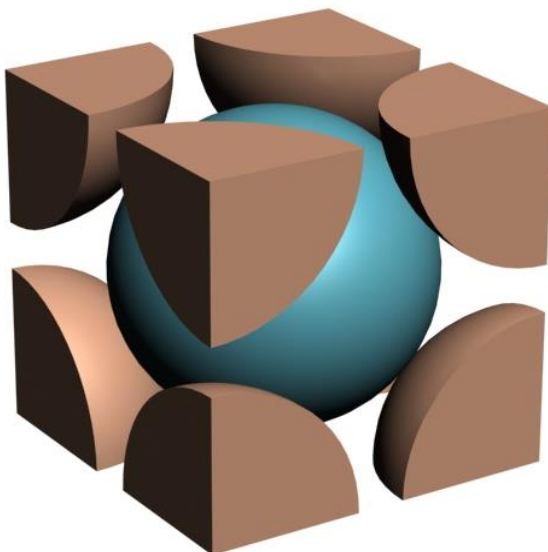
La mayoría de los metales (alrededor del 90 %), cristalizan en tres estructuras cristalinas; cúbica centrada en las caras (FCC), cúbica centrada en el cuerpo (BCC) y hexagonal compacta (HCP). Estas estructuras son densamente empaquetadas y poseen ordenamientos de energía muy bajos y estables, ya que se libera energía a medida que los átomos se aproximan y se enlazan cada vez más estrechamente entre sí (19-21).

Cúbica Centrada en el Cuerpo (BCC): Este tipo de celda unidad se caracteriza porque los átomos (representados como esferas) se encuentran localizados en cada uno de los vértices del cubo y uno en el centro del cubo. Metales que cristalizan en esta estructura son: hierro

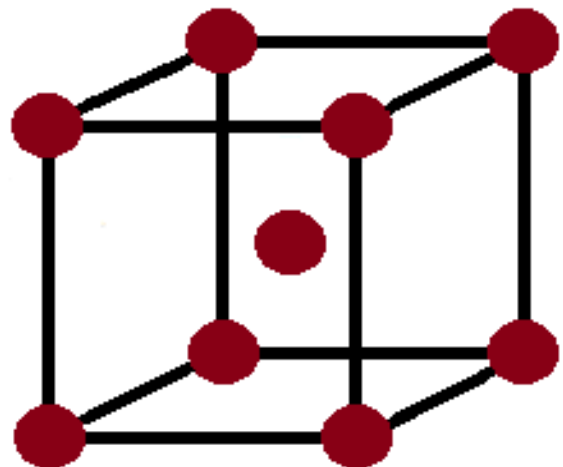
alfa, titanio, tungsteno, molibdeno, niobio, vanadio, cromo, circonio, talio, sodio y potasio entre otros. En esta celda unidad, el átomo central está rodeado de 8 vecinos más cercanos, siendo este su número de coordinación 8. Cada una de estas celdas unidad tiene el equivalente de 2 átomos por celda unidad. Un átomo completo está localizado en el centro de la celda unidad, y un octavo de átomo está localizado en cada vértice de la celda unidad, haciendo el equivalente de otro átomo. De este modo hay un total de 1 (en el centro) + 8 x 1/8 (en los vértices) = 2 átomos por celda unidad. Los átomos en este tipo de celdas se contactan entre sí a través de la diagonal del cubo, y la relación entre la longitud de la cara del cubo a y el radio atómico R es:

$$a = \frac{4R}{\sqrt{3}} \quad (2.2)$$

El 68 % del volumen de la celda está ocupado por átomos y el 32 % restante en espacio vacío, por tal razón, la estructura BCC no es una estructura totalmente compacta, ya que los átomos aún podrían situarse más juntos, por medio de otro ordenamiento o estructura. Un modelo de esta estructura puede ser visto en la figura 2.12.



a) Celda unitaria aislada



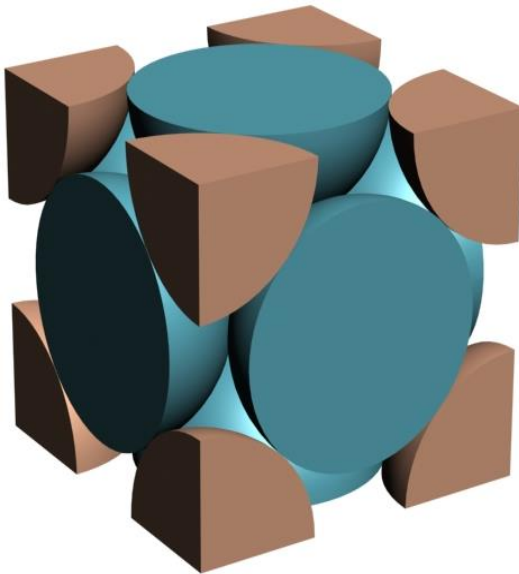
b) Posiciones atómicas de la celda

Figura 2.12. Estructura cúbica de cuerpo centrado BCC (19, 23)

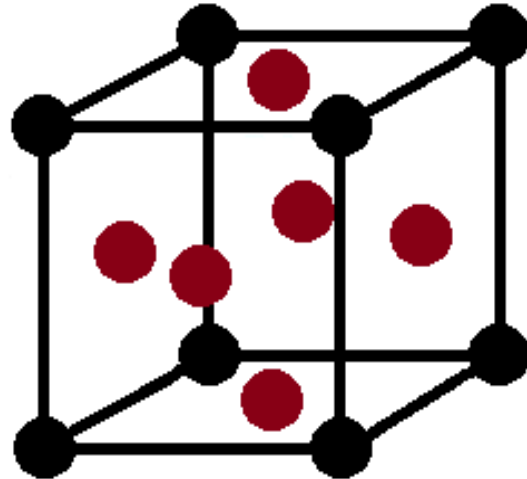
Cúbica Centrada en las Caras (FCC o CCC): Este tipo de celda se caracteriza porque los átomos se encuentran localizados en cada uno de los vértices del cubo y uno en el centro de cada una de las caras del cubo. Metales que cristalizan en esta estructura son: hierro gama, cobre, plata, platino, oro, aluminio, plomo y níquel entre otros. En esta celda unidad, el átomo central de la cara está rodeado de 12 vecinos más cercanos, siendo este su número de coordinación (19, 23).

Cada una de estas celdas unidad tiene el equivalente de 4 átomos por celda, los cuales están en un octavo de átomo en cada vértice ($8 \times 1/8=1$), y seis medios átomos en el centro de cada cara ($1/2 \times 6= 3$). El factor de empaquetamiento atómico es 0,74. El 74 % del volumen de la celda está ocupado por átomos y el 26 % restante en espacio vacío. Comparando con el valor de la celda BCC, en esta los átomos se encuentran más unidos (dejan menos espacio vacío). Un esquema de este tipo de estructura es presentado en la figura 2.13. Los átomos en la celda FCC se contactan entre sí a lo largo de la diagonal de la cara del cubo, así que la relación entre el parámetro de red a y el radio del átomo es:

$$a = \frac{2R}{\sqrt{2}} \quad (2.3)$$



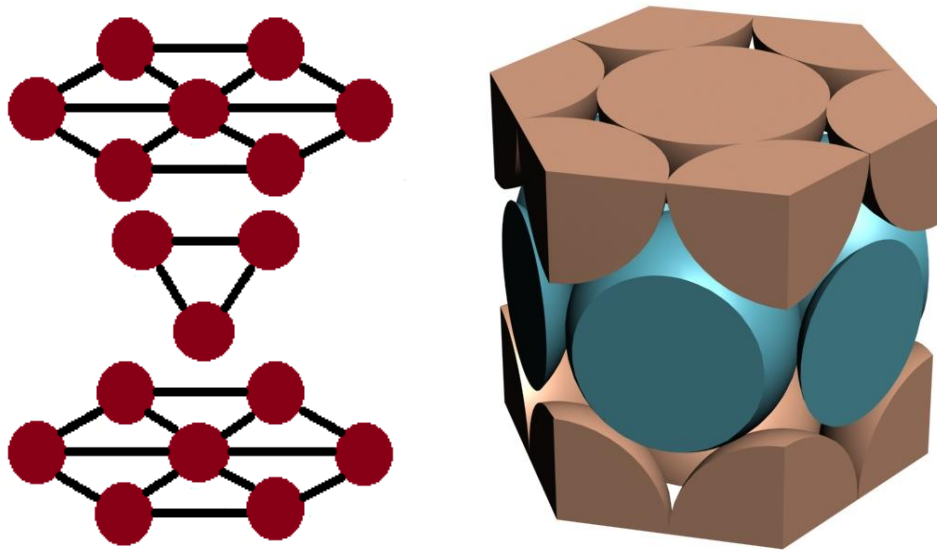
a) Celda unitaria aislada



b) Posiciones atómicas de la celda

Figura 2.13. Estructura cúbica centrada en las caras (FCC) (20, 23)

Hexagonal Compacta HCP: En la estructura hexagonal compacta los átomos ocupan los vértices de un prisma hexagonal regular, los centros de las bases y los centros de los triángulos alternos en que se puede descomponer la sección intermedia del prisma. Las longitudes axiales de esta estructura son la arista de la base, a , y la altura del prisma, c . La estructura hexagonal compacta se construye a partir de la hexagonal simple, pero asociando a cada nudo de la red no un único átomo, sino una pareja de átomos. Los metales no cristalizan en la estructura hexagonal simple porque el nivel de compactación sería demasiado bajo y los átomos tienden a empaquetarse lo más cercano posible. Un modelo de esta estructura se puede ver en la figura 2.14.



a) Posiciones atómicas de la celda

b) Celda unitaria aislada

Figura 2.14. Estructura hexagonal compacta HCP (20, 23)

La cantidad de átomos que se encuentra dentro de la celda es el equivalente de 6 átomos. Un sexto de esfera en cada esquina de la capa superior e inferior de la celda, haciendo el equivalente de dos átomos, tres átomos en el centro y medio átomo en cada una de las capas haciendo 2 átomos. En consecuencia, hay un total de $6 \times 1/6$ (en la capa superior) + $6 \times 1/6$ (en la capa inferior) + 3 (en el centro) + $2 \times 1/2 = 6$ átomos por celda unidad. El número de coordinación de la estructura es 12, como puede visualizarse tomando los vecinos del átomo del centro de una base. El Factor de Empaquetamiento Atómico (APF), para esta

celda es 0,74 (74 %). Algunos metales con estructura HCP son: titanio, magnesio, cadmio, zinc, y cobalto entre otros, siendo la relación ideal c/a de esta estructura de 1,633.

2.4. Solidificación de los metales

La gran mayoría de metales para poder ser transformados en productos requieren de un proceso de extracción de minerales, para poder reducirlos y luego fundirlos para que fluyan por gravedad a un molde en el cual este se enfría y solidifica. Este proceso de solidificación es diferente si el caso es el de un metal puro o el de una aleación. El proceso de solidificación consiste en el cambio de estado de la materia de líquido a sólido producido por una disminución en la temperatura. Es el proceso inverso a la fusión. En general, los compuestos disminuyen de volumen al solidificarse, aunque no sucede en el caso del agua ya que aumenta. El proceso de solidificación es determinante para la calidad del producto final, porque si el material queda defectuoso en esta etapa, será muy difícil efectuar las correcciones en el procesamiento posterior.

Los átomos en los metales exhiben una separación muy específica a una temperatura dada, o energía interna. Debido a que el calor es una forma de energía, la energía interna del metal se incrementa cuando se aumenta la temperatura. Esta adición de energía aumenta la vibración de los átomos, lo que incrementa la distancia entre ellos. Esto se puede observar visualmente en el aumento tamaño del metal, debido a la adición de dicha energía; cualquier disminución en la temperatura del metal hará que los átomos se juntan; y por lo tanto habrá una contracción del metal. Cuando se aumenta la temperatura a la temperatura de fusión, los átomos vibran tanto que pasan al estado líquido. Cuando se enfrían el metal líquido, este cristaliza pasando al estado sólido, lo cual lo realiza en cuatro etapas y se puede ver en la figura 2.15:

- Formación gérmenes
- Formación de núcleos (Nucleación)
- Crecimiento de núcleos
- Conformación de los granos o cristales

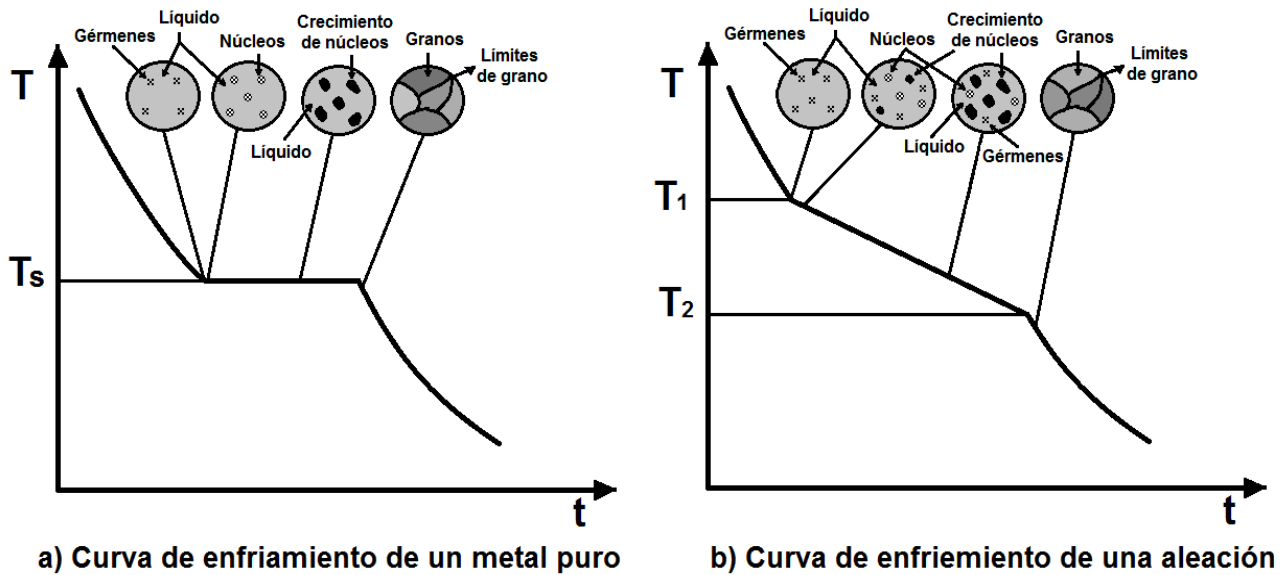


Figura 2.15. Etapas del proceso de solidificación

Los metales en estado líquido tienen sus átomos de forma desordenada, a medida que baja la temperatura y el metal se acerca al punto de solidificación, se inicia un proceso de formación de embriones sobre los que se van agregando átomos, para formar núcleos, a medida que crecen estos núcleos, forman los granos o cristales, este proceso continúa, hasta la solidificación total del metal, donde cada uno de los granos queda separado de los otros por los límites de grano, ya que dichos núcleos tienen distintas orientaciones y cuando los granos adyacentes crecen se chocan formando los límites o bordes de grano, que conforman la estructura cristalina. Cuando se produce la agrupación de átomos y formación de embriones homogéneos, con su ordenación cristalina, se provoca inmediatamente un aumento de temperatura por causa de la liberación del calor latente. Con ello se produciría la fusión de la estructura cristalina del embrión que se formó al transformarse esta energía latente en energía cinética. Así pues, una condición necesaria es que el embrión formado se encuentre a temperatura inferior a la de fusión, lo que se cuantifica con el denominado *grado de subenfriamiento*, ΔT .

La velocidad de formación de embriones y la velocidad de nucleación será una variable importante en el tamaño y la forma de cada estructura. Altas velocidades de nucleación y/o

de crecimiento tendrá como consecuencia tamaños de grano fino, al igual que pequeñas velocidades de nucleación y/o crecimiento tendrán tamaños de grano grueso. Las propiedades mecánicas dependen del tamaño de grano del metal. Un metal con tamaño de grano fino tendrá mejor resistencia a la tracción a temperatura ambiente, debido al mayor número de bordes de grano, que tienden a inhibir la deformación de los cristales cuando el metal se encuentra bajo tensión. Sin embargo, a temperaturas elevadas, los átomos de los bordes del cristal se pueden mover fácilmente y desplazarse, reduciendo la resistencia a altas temperaturas. Por esto los metales de grano fino, se prefieren para servicio a temperatura ambiente o baja, mientras que los materiales con grano grande son preferibles para el servicio a elevadas temperaturas. Los metales de grano fino generalmente dan una mejor ductilidad, mayor tenacidad y mejores propiedades de fatiga. Los metales tienen estructuras cristalinas formadas por átomos en matrices ordenadas, que se conocen como fases y se describen por la celda unitaria. Los metales solidifican a partir de muchos lugares a la vez y crecen en direcciones preferenciales para formar granos o cristales. La unión entre granos individuales se conoce como límite o borde de grano. El tamaño de grano dictará la cantidad de área de borde de grano presente en un metal que determina en cierto grado las propiedades mecánicas del metal.

2.4.1. Sólidos amorfos

Son todos aquellos sólidos en los cuales sus partículas constituyentes presentan atracciones lo suficientemente eficaces como para impedir que la sustancia fluya, resultando una estructura rígida y más o menos dura. No presentan una disposición interna ordenada, por lo tanto no tienen ningún patrón determinado. A temperaturas altas, los sólidos amorfos se transforman en líquidos y sus partículas constituyentes tienen libertad de movimiento, al disminuir lentamente la temperatura, la energía cinética de las partículas se va haciendo tan baja que se puede producir un acomodamiento entre ellas; pero si el enfriamiento se produce por debajo del punto de fusión, se origina una contracción térmica, que no permite el ordenamiento de las partículas, aumentando la viscosidad, por lo que ya no es posible apreciar flujo, y la sustancia adquiere las características de un sólido como: rigidez, dureza,

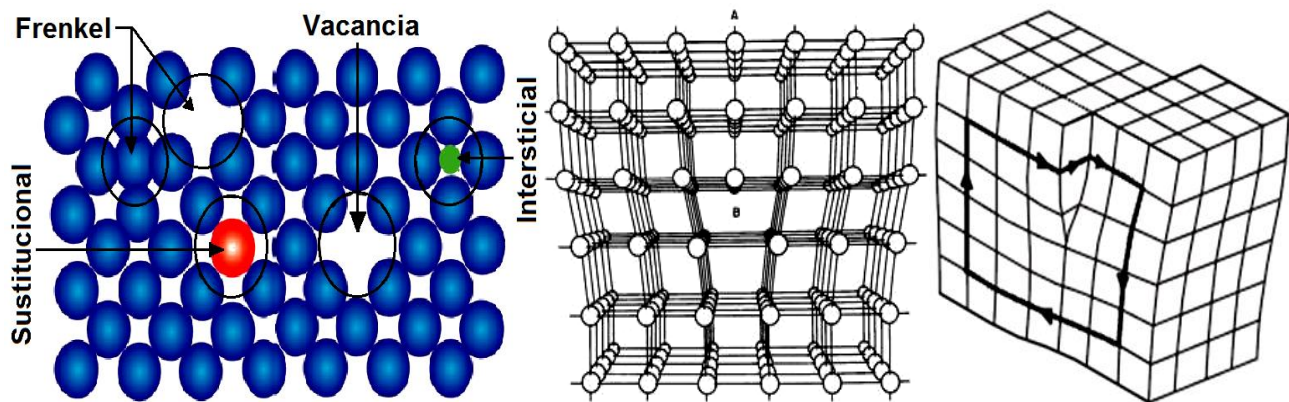
forma y volumen definidos, etc. Como ejemplos se pueden citar: el asfalto, ceras, la brea, vidrio y la mayoría de los polímeros. Cuando un sólido amorfo se quiebra, produce caras y bordes irregulares y al fundirse lo hace en un intervalo de temperaturas, cambiando lentamente del estado sólido al estado líquido (18).

2.4.2. Defectos en estructuras cristalinas

La forma como están localizados los átomos en un material real, generalmente son diferentes a las posiciones ideales que se espera en la estructura cristalina: esas diferencias se pueden explicar incorporando defectos en el arreglo atómico de la estructura. Un defecto cristalino es cualquier perturbación en la periodicidad de la red de un sólido cristalino. El cristal perfecto es un modelo ideal, en el que las diferentes especies (ya sean moléculas, iones o átomos) están colocados de forma periódica y regular, extendiéndose hasta el infinito. En la realidad, cualquier cristal presenta defectos en este modelo ideal, empezando por el hecho de que no hay cristales infinitos. Los defectos cristalinos afectan las propiedades de los materiales cristalinos como la plasticidad, resistencia a la tensión, conductividad eléctrica entre otras. Se pueden clasificar cuatro tipos de defectos como son:

Defectos de punto: Este defecto se da en las posiciones atómicas individuales y se dividen en **vacancias** (son puntos de red vacíos en el cristal), átomo **sustitucional** (son átomos diferentes que sustituyen al átomo original), átomo **intersticial** (son átomos que se introducen en los intersticios que se forman en el arreglo atómico); además se encuentran defectos que involucran dos átomos como el defecto de **Frenkel** que es una combinación entre el defecto de vacancia e intersticial, donde un átomo que se encuentra en un lugar normal de la estructura cristalina salta hacia un lugar intersticial dejando así una vacancia y defecto de **Schottky** o par iónico donde un par de vacancias se presentan en cristales iónicos, donde se debe mantener un equilibrio en la estructura cristalina. Cuando se deja una vacancia de un anión, también debe dejarlo un catión para mantener la electro-neutralidad en la red. En la figura 2.16a se observan algunos defectos puntuales. (21, 22)

Defectos lineales: Este defecto se extiende en una dirección, y afecta a una fila de puntos de la red y reciben el nombre de dislocaciones; también se define como el límite entre dos regiones una de las cuales se ha desplazado con respecto a la otra. Este defecto lineal suele designarse por una “T invertida” (\perp), que representa el borde de un semiplano extra de átomos. Esta configuración conduce por sí misma a una designación cuantitativa sencilla, el vector de Burgers, b . Este parámetro es el vector del desplazamiento necesario para cerrar un circuito realizado por el paso a paso alrededor del defecto. Las dislocaciones pueden ser de borde, helicoidal (tornillo) y mixta; siendo la dislocación mixta una mezcla entre la dislocación de borde y la helicoidal. En la figura 2.16b se observan dislocaciones de borde y helicoidal o tornillo.



a) Defectos de punto

b) defectos lineales (borde y tronillo)

Figura 2.16. Defectos de punto y dislocaciones (8, 19, 20)

Defectos de superficie: Este defecto se extienden en dos dimensiones y separan regiones del material con distintas estructuras cristalinas y/o distintas orientaciones cristalinas y reciben el nombre de: límite de grano, superficie del cristal, fallas de apilamiento y maclas.

Defectos volumétricos: Estos defectos se extienden en 3 dimensiones, distorsionan fuertemente la red, como cavidades, rechupes, inclusiones y poros entre otros.

2.5. Aleaciones

La mayoría de materiales metálicos usados son aleaciones, ya que generalmente presentan mejores propiedades que los metales puros; estas aleaciones contienen diferentes elementos metálicos como es el caso del latón que es una aleación de zinc con cobre; en otras ocasiones contienen elementos no metálicos como en el caso del acero que es una aleación de hierro con carbono entre otros elementos de aleación. Los elementos aleantes son incluidos en la red del metal base (la forma general en que se acomoda cada átomo individual) en distintas formas que dependen en los tamaños relativos de los átomos. Los átomos más pequeños, tales como el carbono, nitrógeno e hidrógeno, tienden a ocupar lugares intersticiales entre los átomos que forman la estructura cristalina de la red. En el acero, pequeñas cantidades de carbono pueden ocupar sitios intersticiales entre los átomos de hierro. Los elementos aleantes con átomos de tamaños cercanos al del metal base tienden a ocupar lugares sustitucionales, reemplazando los átomos del metal base en la estructura de la red. La aleación de cobre y níquel es un ejemplo.

La mezcla de elementos aleantes producen irregularidades en la estructura cristalina, además, la presencia de estos elementos aleantes ejerce distintos grados de atracción y repulsión para re-organizar la estructura cristalina que de alguna manera está distorsionada. Esto tiende a incrementar la energía interna del metal y puede dar como resultado un incremento de las propiedades mecánicas. La microestructura es la principal responsable de las propiedades de la aleación, siendo afectada por la composición o el contenido de aleantes, y por otros factores tales como conformación y operaciones de tratamiento térmico. La microestructura se ve muy afectada por la operación de soldadura, que tiene influencia sobre las propiedades de la aleación. Para que sea una aleación la mezcla de los elementos después de la fusión y solidificación debe tener propiedades metálicas en estado sólido. Una clasificación sencilla de las aleaciones son: ferrosas (contienen hierro) y no ferrosas, teniendo en cuenta el componente mayoritario. Las aleaciones ferrosas se clasifican a su vez, por su contenido en carbono en aceros (porcentaje de carbono menor al

2 %) y fundiciones o hierros de fundición (porcentaje de carbono mayor al 2 %, más silicio).

2.6. Diagrama de fases Hierro-Carbono

Los diagramas de fase son representaciones gráficas bajo condiciones termodinámicas de equilibrio, que relacionan temperatura, composición química, cantidad y tipos de fases en equilibrio (microestructura) de un sistema de aleaciones, en donde la microestructura de los materiales tiene relación directa con sus propiedades mecánicas, físicas y químicas. El estado de equilibrio de un sistema es aquel en el cual sus propiedades no cambian con el tiempo, a menos que se ejerza una alteración de temperatura, presión, composición o la aplicación de fuerzas externas de tipo eléctrico, magnético, entre otras (21). Las variables independientes en los sistemas de un componente están limitadas a la temperatura y la presión ya que la composición es fija. En un diagrama de fases de un sistema de un componente se pueden distinguir: **Zonas bivariantes**, es decir, zonas del diagrama donde sólo está presente una fase, a diferentes presiones y temperaturas, tales como las zonas de líquido, sólido o vapor; **líneas univariantes**, en las que hay dos fases presentes. Es el caso de las líneas solidificación, vaporización y sublimación, en estas líneas coexisten dos fases y para cada temperatura existe una presión determinada; **Puntos invariantes**, en los que coexisten tres fases. En los sistemas binarios bajo estas condiciones pueden coexistir tres fases produciendo una condición invariante (punto triple); dos fases producen una condición univariante (línea) y una fase una condición bivariante (zona de equilibrio). Algunos puntos invariantes son: (21)

- | | |
|-----------------|--|
| 1. EUTÉCTICO | Sólido α + Sólido β \leftrightarrow Líquido 1 |
| 2. PERITÉCTICO | Sólido α \leftrightarrow Sólido β + Líquido 2 |
| 3. MONOTÉCTICO | Sólido + Líquido 1 \leftrightarrow Líquido 2 |
| 4. EUTECTOIDE | Sólido δ + Sólido β \leftrightarrow Sólido α |
| 5. PERITECTOIDE | Sólido δ \leftrightarrow Sólido β + Sólido α |

Las transformaciones de fase Fe-C, se presentan durante el proceso de solidificación y enfriamiento del acero y las fundiciones. Cuando se da el paso desde el estado líquido hasta el estado sólido ocurren las primeras transformaciones, sin embargo, son posibles otras transformaciones de fase en el estado sólido, cuando el material es calentado a temperaturas adecuadas y enfriado de forma controlada. En función del modo de enfriamiento, las transformaciones de fase se pueden clasificar en transformaciones en equilibrio y transformaciones fuera del equilibrio. Las transformaciones de equilibrio y por consiguiente las fases de equilibrio pueden ser obtenidas en el respectivo diagrama de fases hierro-carbono (figura 2.17). Como equilibrio se entiende aquella transformación en la que el tiempo es suficientemente largo, de modo que la transformación sea dominada por la difusión (19, 21). Las fases que se pueden encontrar dentro del diagrama de equilibrio son:

- 1. Ferrita:** solución sólida de Fe- α (BCC), con composición máxima del 0,025 % de C.
- 2. Austenita:** solución sólida de Fe- γ (FCC), con composición máxima del 2 % de C.
- 3. Cementita:** carburo de hierro (Fe₃C), compuesto por 6,67 % de C.
- 4. Perlita:** eutéctico compuesto por 86,5 % de Ferrita y 13,5 % de cementita, con estructura laminar.
- 5. Ledeburita:** eutéctico con composición 4,3 %C y contiene un 52 % de cementita y 48 % de austenita, en donde la austenita de la ledeburita se transforma a los 723 °C en cementita y perlita.

En el caso de las transformaciones fuera del equilibrio, el tiempo de enfriamiento juega un papel importante en la fase o microestructura que se puede formar en el material. En este caso, la velocidad de crecimiento de las fases es mayor que la velocidad a la que se mueven los átomos durante el proceso difusivo. Como ejemplo de fases consideradas de no equilibrio están la martensita y la bainita. Controlando el calentamiento, sostenimiento a una temperatura determinada y el enfriamiento de piezas de acero, incluso en función del tipo de acero; es decir, si es o no aleado, si es de bajo, medio o alto contenido de carbono, etc., es posible obtener otro tipo de fases o micro constituyentes tales como precipitados duros, como carburos, nitruros, carbonitruros, carburos de cromo, de tungsteno, de vanadio,

etc. Estos precipitados se pueden formar desde el estado líquido (precipitados de alta temperatura), o durante el estado sólido (precipitados de baja temperatura), variando en forma, cantidad, tamaño; estos precipitados afectan las propiedades mecánicas del material (19, 21).

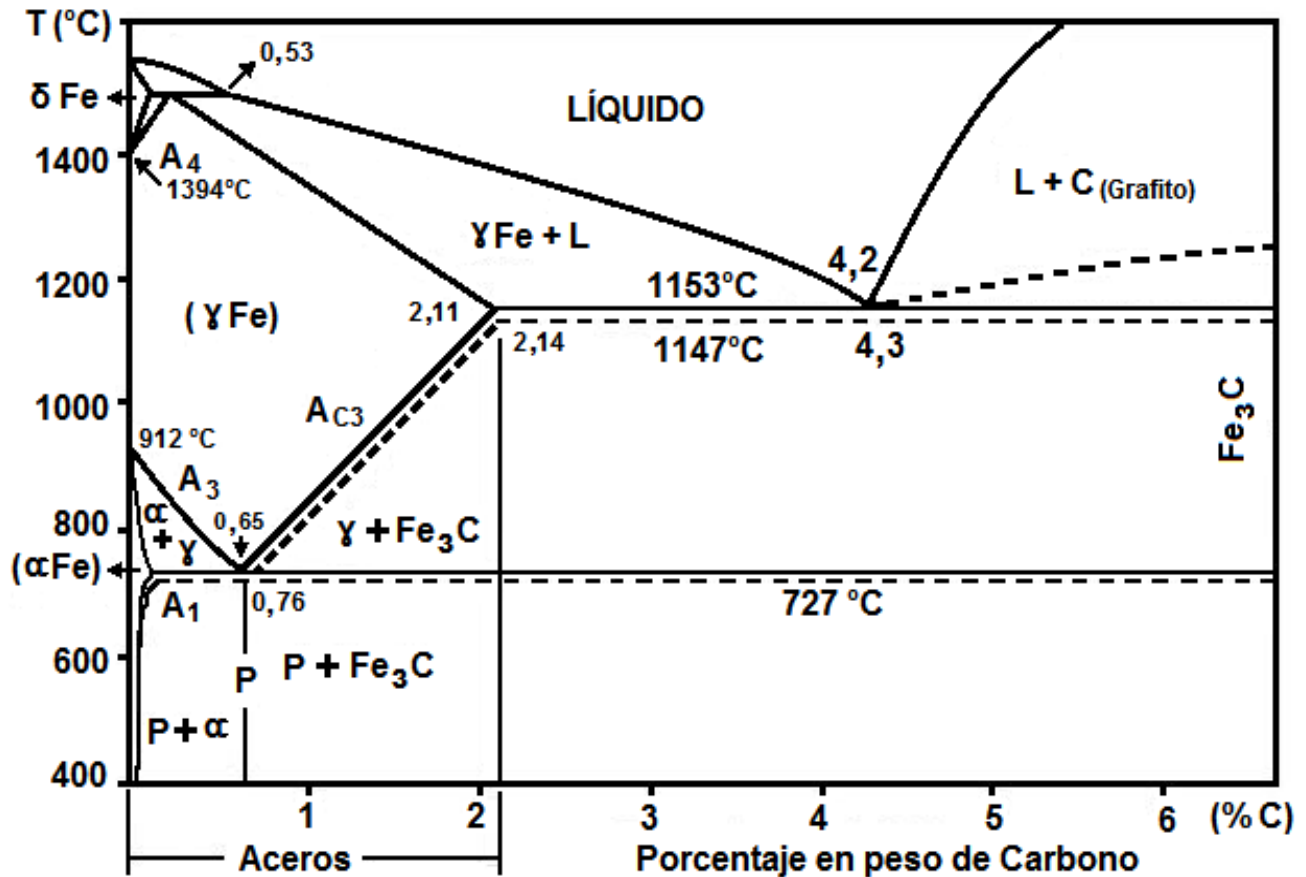


Figura 2.17. Diagrama de fases Hierro – Carbono (19-22)

2.6.1. Alotropía o polimorfismo del hierro

La ferrita (hierro α , hierro β), la austenita (hierro γ) y el hierro δ son estados polimórficos del hierro, siendo el polimorfismo la capacidad que tiene un material de existir en diferentes estructuras cristalinas a diferentes temperaturas. El hierro tiene distintas estructuras o redes cristalinas, dependiendo de la temperatura a la que se encuentre y por consiguiente cada microestructura conduce a propiedades diferentes. El hierro en estado

líquido no posee estructura cristalina, pero a medida que se solidifica, lo hace en una estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC), conocida como hierro delta y se mantiene así hasta los 1400 °C aproximadamente. A medida que se sigue disminuyendo la temperatura, y la estructura cristalina cambia a cúbica centrada en las caras (FCC) y se conoce como hierro gamma, esta estructura se mantiene hasta los 910 °C aproximadamente. A medida que continua el enfriamiento y pasa de los 910 °C, el hierro presenta una segunda transformación polimórfica, donde se vuelve a transformar en una estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC), conocida como hierro beta, la cual es no magnética, pero solo mantiene esta propiedad hasta 770 °C, ya que por debajo de 770 °C y hasta la temperatura ambiente, el hierro se vuelve magnético y recibe el nombre de hierro alfa. El cambio estructural en la red cristalina del hierro conlleva a la modificación de algunas de sus propiedades como la solubilidad máxima del carbono en el hierro y viene dada así: (18, 22)

Hierro delta BCC (1538 °C a 1400 °C) el porcentaje de carbono es 0,10 %

Hierro gamma FCC (1400 °C a 910 °C) el porcentaje de carbono es 2,06 %

Hierro beta BCC (910 °C a 770 °C) el porcentaje de carbono es 0,025 %

Hierro alfa BCC (menos de 770 °C) el porcentaje de carbono es 0,025 %

2.7. Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos involucran operaciones de calentamiento y enfriamiento para modificar la micro-estructura de un metal, sin cambiar su composición química, pero cambian sus propiedades mecánicas. La finalidad de los tratamientos térmicos es mejorar las propiedades mecánicas del material como dureza, resistencia a la tensión, tenacidad y maquinabilidad entre otras, para adecuarlos a su uso final. Los tratamientos termo-químicos se altera o cambia su composición y micro estructura del material mediante un proceso de difusión. Los tratamientos térmicos más importantes son: **temple, recocido, revenido, bonificado y normalizado**. Un tratamiento térmico consta de tres etapas que se presentan a continuación:

* **Calentamiento a una temperatura fija:** La elevación de temperatura se realiza en un horno y debe ser uniforme en la pieza; generalmente a una temperatura por encima de A_3 si el acero es hipoeutectoide, y por encima de A_1 si el acero es eutectoide o hipereutectoide (21, 22).

* **Homogenización a la temperatura:** Se mantiene la pieza a la temperatura deseada para que se homogenice todo el volumen de la pieza y se complete la transformación de la micro-estructura de partida. Una permanencia de unos 2 minutos por milímetro de espesor puede ser suficiente (21, 22).

* **Enfriamiento:** El enfriamiento tiene que ser controlado en función del tipo de tratamiento térmico que se realice y las propiedades mecánicas que se estén necesitando en la pieza (21, 22).

2.7.1. Temple

Este tratamiento térmico se realiza calentando el acero hasta la zona austenítica tomando como base el diagrama Fe-C, para luego realizar un enfriamiento rápido de forma continua o escalonada en un medio como agua, aceite o aire, entre otros, para transformar la austenita en martensita. El **agua** es el medio más económico y se consiguen buenos temple en aceros al carbono, en donde las piezas se deben agitar dentro del agua para eliminar las burbujas de gas durante el temple; **aceite** enfría más lento que el agua; y el **aire** se enfrían las piezas con corrientes de aire; se utiliza para los aceros rápidos. Cuando se realice un temple, hay que tener en cuenta el tamaño de la pieza y el espesor de la zona más gruesa, ya que a mayor espesor se tendrá que aumentar el tiempo de duración del proceso de calentamiento y sostenimiento a la temperatura de austenización. Se debe conocer la composición química del acero, ya que en general, los aceros aleados son más templables. El tamaño del grano influye principalmente en la velocidad crítica del temple, teniendo más templabilidad el de grano grueso. El medio de enfriamiento influye en la templabilidad del acero, siendo el más adecuado para templar, el que consiga una velocidad de temple

ligeramente superior a la velocidad crítica de temple. Mediante el temple se consigue: aumentar la dureza y la resistencia mecánica, disminuir la tenacidad (aumento de la fragilidad), disminuir el alargamiento unitario y modificar algunas propiedades eléctricas y magnéticas (19, 21, 22).

La templabilidad es la aptitud de los aceros para dejarse penetrar por el temple, que es diferente a la capacidad de temple que es la capacidad de un acero para adquirir dureza mediante el temple por formación de martensita, como consecuencia de un tratamiento térmico. Por tanto, la templabilidad se refiere únicamente a la facilidad de penetración por el temple y no a las características obtenidas por él. En la templabilidad influyen principalmente los elementos de aleación como el manganeso, molibdeno y el cromo y el tamaño de grano. Para determinar el grado de templabilidad de un acero se realiza el **ensayo Jominy**. Este ensayo consiste en realizar el templado de una probeta cilíndrica de 25 mm de diámetro y 100 mm de largo; la cual se calienta hasta la temperatura de austenización y se mantiene por unos 30 minutos, luego se enfría con un chorro de agua solo por la parte inferior de la probeta. Una vez este fría la probeta, se determina la dureza a lo largo de los 50 primeros milímetros; en los primeros 12,5 mm las lecturas de dureza se toman a intervalos de 1/16 in (1,6 mm) y en los 37,5 mm siguientes cada 3,2 mm. Se traza una curva de templabilidad representando los valores de dureza en función de la distancia al extremo templado. El estudio de los resultados permite definir el comportamiento del material ante el tratamiento de temple. Existen diferentes tipos de temple como:

1. Temple continuo de austenización completa: se realiza a los aceros hipoeutectoides. Se calienta el material a 50 °C por encima de la temperatura crítica superior A₃, enfriándose en el medio adecuado para obtener martensita.

2. Temple continuo de austenización incompleta: se realiza a los aceros hipereutectoides. Se calienta el material hasta A_{C1} + 50 °C, transformándose la perlita en austenita y dejando la cementita intacta. Se enfría a una velocidad superior a la crítica, con lo que la estructura resultante es de martensita y cementita.

3. Temple superficial: el núcleo de la pieza permanece inalterable, blando y con buena tenacidad, y se temple la superficie, aumentando su dureza. Con el temple superficial se consigue que solamente la zona exterior se transforme en martensita, y para ello el tiempo durante el que se mantiene el calentamiento debe ser el adecuado para que solamente un reducido espesor de acero se transforme en austenita y luego se pueda templear.

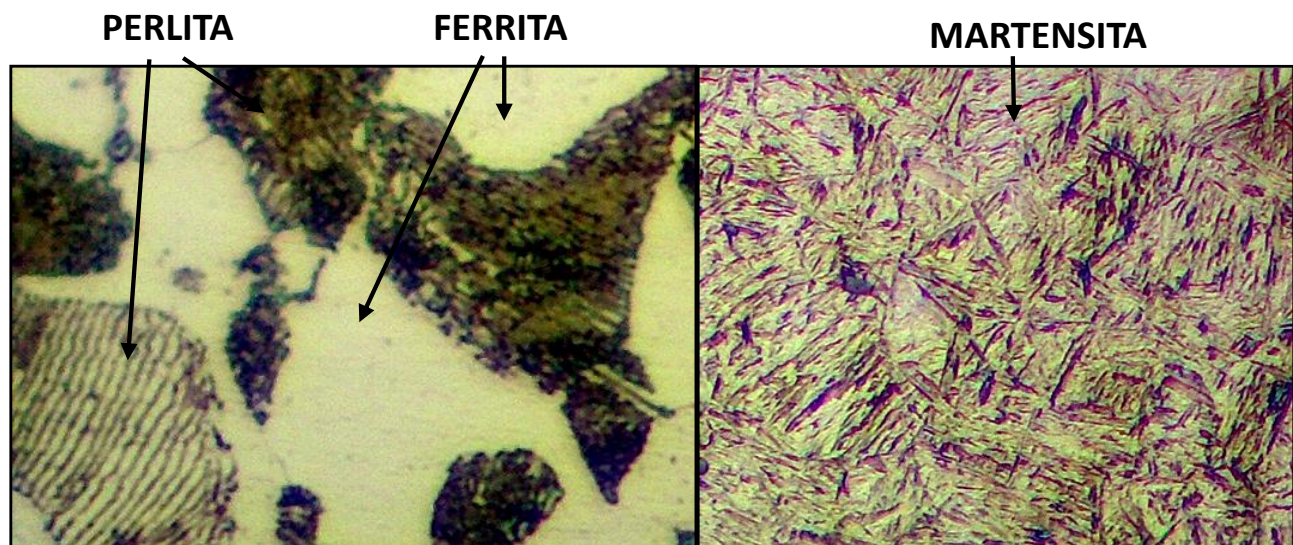
4. Temple Escalonado (Martempering): consiste en calentar el acero a temperatura de austenización y mantenerlo el tiempo necesario para que se transforme completamente en austenita. Luego se enfría en un baño de sales hasta una temperatura próxima pero superior a M_s ($200^{\circ}\text{C} - 400^{\circ}\text{C}$), con el fin de homogeneizar la temperatura en toda la pieza y la austenita se transforme en martensita. Este temple reduce la distorsión, el agrietamiento y las tensiones residuales.

5. Temple isotérmico (Austempering): consiste en calentar el acero a temperatura de austenización y mantenerlo el tiempo necesario para obtener austenita. Posteriormente se enfría bruscamente en un baño de sales hasta una temperatura determinada, para igualar la temperatura en toda la masa y luego se vuelve a disminuir la temperatura para que toda la pieza se transforme en bainita.

2.7.2. Recocido

Este tratamiento térmico tiene la finalidad de ablandar el metal o acero, eliminando las tensiones internas y recuperando la microestructura. En el recocido se calienta el metal hasta una determinada temperatura y luego se enfría lentamente, generalmente apagando el horno y dejando las piezas en su interior. De esta forma se obtienen estructuras de equilibrio. Son generalmente tratamientos iniciales mediante los cuales se ablanda el acero, ya que se consigue aumentar la plasticidad, ductilidad y tenacidad del material; se elimina la acritud y se afina el grano y se homogeniza la micro estructura. En ocasiones el recocido suprime los efectos del temple. En este tratamiento térmico se pueden distinguir los siguientes tipos de recocidos:

1. Recocidos supercríticos: Se denominan recocidos supercríticos porque requieren la austenización previa del acero al menos por encima de la temperatura crítica. Tienen por finalidad ablandar el acero para poder mecanizarlo o conformarlo en frío. Ello es posible por lograr una estructura ferrítico-perlítica que es más blanda que la bainítica o la martensítica. Hay dos tipos: **Recocido de austenización completa:** Para efectuar un recocido de regeneración se calienta el acero hasta una temperatura superior a A_3 y se mantiene hasta lograr la estructura austenítica en todos los puntos de la pieza y se enfría lentamente. Este tratamiento afina el grano cuando ha crecido producto de un mal tratamiento. **Recocido de austenización incompleta:** Para efectuar este recocido de globulización, se calienta la pieza de acero hasta una temperatura cercana a la crítica A_1 comprendida entre A_3 y A_{C3} . Se mantiene a esa temperatura un tiempo menor que el preciso para lograr plenamente las fases de equilibrio, que son ferrita y austenita. A esa temperatura habrá cementita además de ferrita y austenita. A continuación se enfría lentamente la pieza de acero. Al término de la transformación se obtiene una estructura con matriz ferrítica y un agregado que recibe el nombre de globulita (globalización del carburo de hierro - cementita). Este tratamiento elimina tensiones y mejora la maquinabilidad del acero (19, 20). En la figura 2.18 se observan las microestructuras de un acero recocido y un acero templado.



a) Acero SAE 4140 recocido

b) Acero SAE 4140 Templado

Figura 2.18. Estructuras ferríticas, perlíticas y martensíticas del acero SEA 4140

2. Recocidos isotérmicos: Se hace particularmente necesario cuando el acero tiene gran templabilidad, como en los aceros autotemplantes empleados para herramientas. En efecto, cuanto más fácil resulta de templar un acero más difícil resulta de ablandar por recocido. Este tratamiento de ablandamiento consiste en calentar el acero por encima de la temperatura crítica superior A_3 y enfriarlo luego a $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ o $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, para posibilitar la transformación de la austenita en perlita, esto puede durar varias horas; pues de lo contrario las estructuras finales serían bainíticas o martensíticas. Las durezas son muy bajas y pueden graduarse según la temperatura seleccionada; también mejora la maquinabilidad del acero.

3. Recocidos subcríticos (intercrítico): En los recocidos subcríticos el calentamiento nunca alcanza la temperatura de austenización ($723\text{ }^{\circ}\text{C}$ para aceros al carbono). Tienen por objetivo aliviar las tensiones internas del acero, producidas por soldadura, deformación plástica y fundición entre otras. Este tratamiento mejora la ductilidad y la resistencia a la corrosión. El recocido subcrítico no implica la formación de austenita, mientras que el recocido intercrítico implica formación de ferrita y austenita.

4. Recocido de recristalización: Se realiza un calentamiento a una temperatura entre $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, seguido de un enfriamiento dentro del horno. Se realiza en aceros que tienen demasiada acritud, reduciendo las tensiones. Mejora la ductibilidad y maleabilidad del acero y poder someterlo a nuevos estirados o laminados, además se puede dar mayor cristalinidad y quitar impurezas.

5. Recocido de homogenización: Este tratamiento tiene por objeto destruir la heterogeneidad química del material o aleación producida por una solidificación defectuosa y de esta forma tener una aleación o material homogéneo. Este tratamiento se realiza a temperaturas elevadas cercanas a la temperatura de fusión y se aplica principalmente a metales propensos a segregaciones, obteniéndose grano grueso por lo que es necesario un recocido completo posterior.

2.7.3. Revenido

En este tratamiento térmico se calienta la pieza a una temperatura por debajo A_{C1} (730 °C), según el tipo de acero y se hace un sostenimiento a esta temperatura seguido de un enfriamiento adecuado. El revenido se considera un tratamiento térmico complementario al temple, ya que el temple produce un aumento de la fragilidad debido a la transformación martensítica; a esta unión de los dos tratamientos térmicos se llama **bonificado**. El revenido disminuye la elevada fragilidad del acero producida por el temple, así como proporcionar a los aceros una cierta tenacidad, a la vez que se eliminan o disminuyen las tensiones producidas por el temple. La mayor tenacidad de las piezas revenidas tiene como consecuencia una cierta disminución de la dureza conseguida durante el temple. Generalmente se puede decir que con la temperatura ascendente de revenido, aumentan la elasticidad y alargamiento y disminuyen la resistencia y la dureza (a excepción de los aceros rápidos). El efecto del revenido depende de la aleación del acero, del temple, del espesor de la pieza y del tratamiento aplicado. El efecto del revenido es más fuerte para piezas de acero poco aleado, de dimensiones delgadas y de mayor contenido en carbono. El resultado final no depende de la velocidad de enfriamiento del revenido (19, 20).

2.7.4. Normalizado

En este tratamiento térmico se calienta la pieza hasta la temperatura de austenización, lográndose homogenizar la microestructura en este estado y posteriormente se deja enfriar al aire. La ventaja frente al recocido es que se obtiene una estructura granular más fina y de mayor resistencia mecánica. La desventaja es que la ductilidad y plasticidad es menor. Mediante este proceso se consigue subsanar efectos de las operaciones anteriores de la elaboración en caliente (colada, forja, laminación) eliminando las tensiones internas; se mejora en material para un mecanizado o temple, aunque en ocasiones puede ser un tratamiento térmico final. En el caso de los aceros con bastante contenido en carbono y mucha templabilidad, este tratamiento puede equivaler a un temple parcial, donde aparezcan productos perlíticos y martensíticos. Para aceros con bajo contenido de carbono

no aleados no existe mucha diferencia entre el normalizado y el recocido. La velocidad de enfriamiento permite obtener estructuras perlíticas laminares muy finas. Se puede realizar el tratamiento a una alta temperatura, ya que acorta el periodo de homogeneización, reduciendo el tiempo de operación (se tarda menos para austenizar plenamente la estructura cuanto más alta es la temperatura de austenización). Pero no se deben sobrepasar las temperaturas recomendadas a fin de evitar los riesgos de sobrecalentamiento y quemado. En la figura 2.19 se observan representaciones de las velocidades de calentamiento y enfriamiento de los tratamientos térmicos.

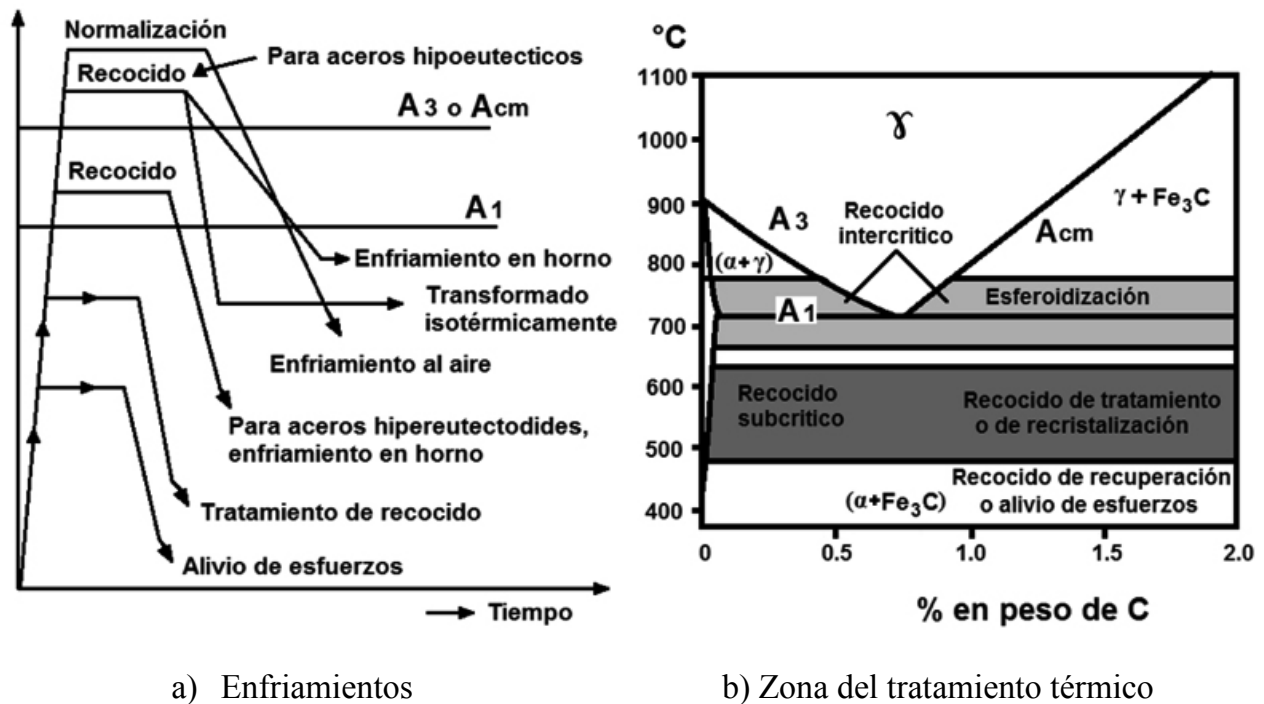


Figura 2.19. Velocidades de enfriamiento de los tratamientos térmicos (8, 19, 20)

2.7.5. Tratamientos termoquímicos

Los tratamientos termoquímicos forman parte de los tratamientos térmicos, ya que la pieza sufre un calentamiento y posteriormente un enfriamiento, con la diferencia que la pieza se ha recubierto de una sustancia química que modifica su estructura superficial y cambia su composición química. Las sustancias químicas utilizadas normalmente son: carbono,

nitrógeno y azufre, pudiendo estar en estado gaseoso, líquido o sólido. Los tratamientos termoquímicos más importantes son: **cementación, nitruración, cianuración, carbonitruración y sulfinización**. Con estos procesos se puede mejorar la dureza superficial de las piezas, sin disminuir la tenacidad del núcleo, aumentar la resistencia al desgaste aumentando el poder lubricante y aumentar la resistencia a la fatiga y/o la corrosión, sin modificar otras propiedades esenciales tales como ductilidad. A continuación se dan algunos conceptos básicos de los tratamientos termoquímicos más importantes.

1. Cementación: Consiste en aumentar la cantidad de carbono (carburar) de la superficie de una pieza, rodeándola de un producto carburante como carbón vegetal, cianuro sódico o hidrocarburos y calentándola a una temperatura de asutenización alta, para que por medio de la difusión del carbono modifique la superficie y luego se finaliza con un tratamiento térmico de temple y revenido (bonificado). El espesor de la capa cementada depende de la temperatura y del tiempo que dure la operación. Se consiguen superficies de gran dureza y núcleo con buena tenacidad. Se aplica a piezas resistentes al desgaste y a impactos. Los aceros de baja contenido de carbono son apropiados para este tratamiento, ya que conserven la tenacidad en el núcleo. El cromo acelera la velocidad de penetración del carbono. Los aceros al cromo níquel tienen buenas cualidades mecánicas y responden muy bien a este proceso. Una concentración de níquel por encima del 5 %, retarda el proceso de cementación (19).

2. Nitruración: En este tratamiento se enriquece la superficie de la pieza con nitrógeno formando nitruros, por medio de una corriente de amoníaco. Se consiguen altas durezas y superficies muy resistentes al desgaste, la corrosión y la fatiga. Se aplica a piezas sometidas a impactos y rozamientos como en ruedas dentadas, árboles de levas, ejes de cardán entre otros. Es especialmente recomendable para aceros aleados con cromo, vanadio, aluminio, tungsteno y molibdeno, ya que forman nitruros estables a la temperatura de tratamiento. Son estos nitruros los que proporcionan la dureza. La penetración de este tratamiento es muy lenta, del orden de un milímetro de espesor por cada 100 horas, aunque después de esto, la pieza no necesita de temple. Este tratamiento se realiza normalmente en hornos

eléctricos a temperaturas aproximadas a los 500 °C, por cuya cámara circula el gas de amoníaco. Tanto la temperatura como la concentración del gas de amoníaco, deben mantenerse constante durante todo el proceso. Además, en caso de existir alguna parte de la pieza que no se desee nitrurar, se introducen dichas partes en una solución de estaño y plomo al 50 % antes del tratamiento de nitruración para evitar que la atmósfera de nitrógeno los afecte (19, 20).

3. Cianuración: se puede considerar como un tratamiento térmico intermedio entre la cementación y la nitruración, ya que el endurecimiento se consigue por la acción combinada del carbono y el nitrógeno. Se realiza a una temperatura entre 750 °C y 950 °C; para ello se introduce la pieza en una solución que generalmente consta de cianuro de sodio con cloruro de sodio y carbonato de sodio. El enfriamiento se hace directamente por inmersión (en agua o aceite) al salir del baño de cianuro con esto se obtiene una profundidad de superficie templada uniforme de unos 0,25 mm en un tiempo de una hora de tratamiento. La cianuración puede ser sólida, líquida o gaseosa. Se cianura colocando las piezas en baños de mezclas de sales fundidas (cianuro, HCN), de modo que el carbono difunda desde el baño hacia el interior del metal, produciendo una capa más profunda, más rica en carbono y con menos nitrógeno. Posteriormente hay que templar las piezas. Este tratamiento se realiza cuando se quiere obtener una superficie dura y resistente al desgaste (19, 20).

4. Carbonitruración: este procedimiento consiste en endurecer superficialmente el acero a temperaturas alrededor de 850 °C, por enriquecimiento superficial simultáneo con carbono y nitrógeno por medio de un gas carbonoso o un líquido carburante que se vaporiza dentro del horno y el nitrógeno proviene del amoníaco que se incorpora al gas cementante. Por este proceso se obtienen superficies extremadamente duras con un núcleo tenaz, sumado a otras propiedades mecánicas como resistencia a la fatiga, resistencia al desgaste y resistencia a la torsión. Una ventaja significativa que presenta este proceso es que tiene muy poca deformación debido a que el nitrógeno absorbido en el proceso disminuye la velocidad crítica de temple del acero. En este proceso se consiguen capas hasta de 1,5 mm,

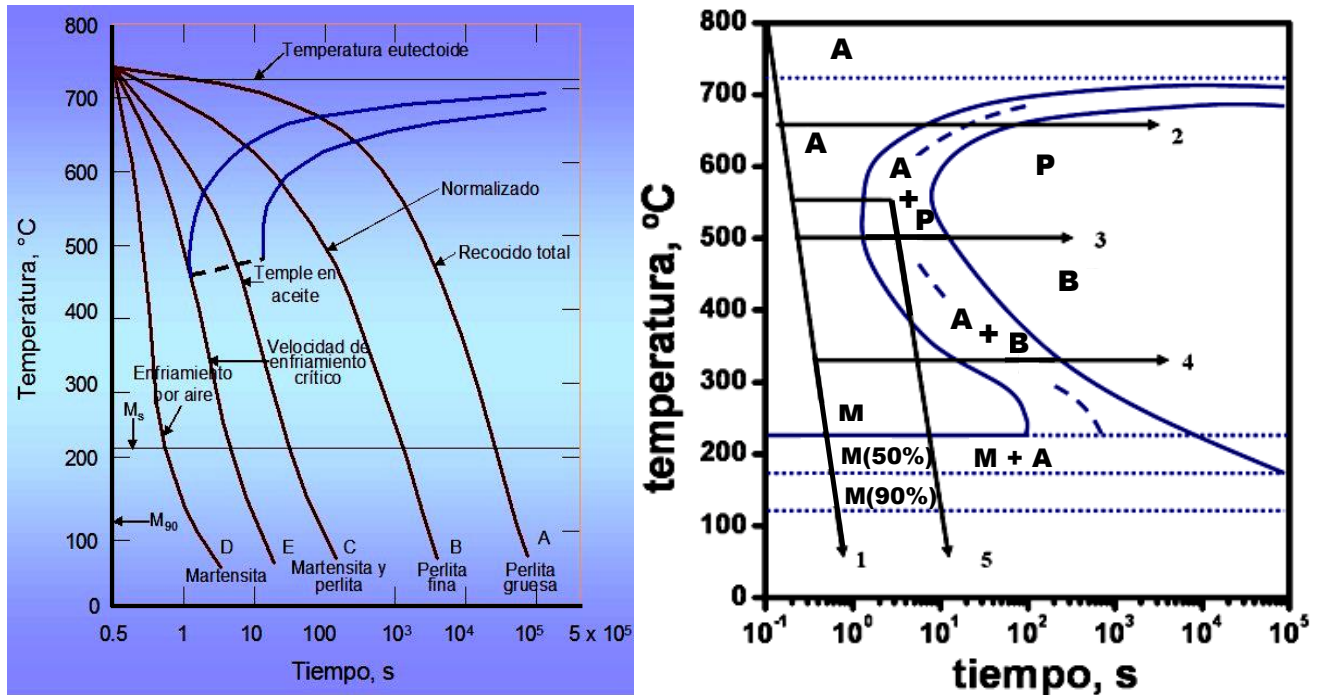
en hornos de atmósfera controlada. El proceso es similar a la cementación, pero con la adición de nitrógeno por medio de la disociación del amoníaco, en donde la cantidad de nitrógeno depende de la composición del baño y de la temperatura, reduciendo la cantidad de nitrógeno a medida que aumenta la temperatura del tratamiento.

5. Sulfinización: Consiste en aportar a la superficie azufre, carbono y nitrógeno para mejorar la resistencia al desgaste, favorecer la lubricación y mejora el mecanizado. Se realiza en piezas ya terminadas. Consiste en elevar la temperatura de la pieza a 575 °C aproximadamente, en un baño de sales que es la fuente de carbono, nitrógeno y azufre (estos dos últimos en menor cantidad), en aleaciones férreas y de cobre. La incorporación superficial del azufre genera sulfuro de hierro (S_2Fe) como inclusión no metálica (impurezas), y se aloja en los bordes de grano lo que fragiliza al metal, lo cual hace que disminuya el punto de fusión. Después de la sulfinización las dimensiones de las piezas aumentan ligeramente, aumentando su resistencia al desgaste, favoreciendo la lubricación y evitando el agarrotamiento. Se aplica a herramientas.

2.7.6. Diagramas TTT (Tiempo-Temperatura-Transformación)

Estos diagramas, conocidos como tiempo-temperatura-transformación, relacionan el tiempo y la temperatura requeridos para una transformación isotérmica mediante un enfriamiento continuo. Los diagramas TTT son gráficas que representan la temperatura (eje vertical) con el porcentaje de transformación frente al logaritmo del tiempo (eje horizontal). Se usan para predecir la microestructura y dureza luego de los tratamientos térmicos o para especificar que microestructura y dureza se logrará por medio del tratamiento térmico. Son muy útiles para entender las transformaciones del acero cuando se enfría continuamente como se puede observar en la figura 2.20a o con enfriamientos isotérmicos como se puede observar en la figura 2.20b. Estos diagramas muestran cómo afecta la velocidad de enfriamiento a la transformación de la austenita en perlita (ferrita y cementita), bainita y martensita. Para el acero y más concretamente en fase austenítica que es inestable debajo de la temperatura de transformación eutectoide, se necesita saber cuánto tiempo requerirá para empezar a

transformarse y cuánto tiempo precisará para estar completamente transformada, además de conocer cuál será el producto de esta transformación (19, 21). En la figura 2.20 se observa un diagrama tiempo-temperatura-transformación (TTT), donde A es austenita, B es bainita, M es martensita y P es perlita.



a) Diagrama con enfriamiento continuo b) Diagrama con enfriamiento isotérmico

Figura 2.20. Diagrama tiempo – temperatura – transformación (TTT) (8, 19-21)

2.8. Aceros

El acero es una aleación de hierro, carbono (entre el 0,05 % y el 2 %), con otros elementos de aleantes como cromo, níquel, y manganeso entre otros, que se agregan para obtener ciertas propiedades y condiciones de servicio, aptas para ser deformadas en frío y en caliente. Aunque teóricamente un acero puede contener cerca de 2 % de carbono, en general este porcentaje no excede el 1,1 %. El hierro no se encuentra libre en la naturaleza, ya que esta químicamente unido con el oxígeno formando óxidos. Los óxidos de hierro se encuentran en cantidades significativas en el mineral de hierro, el cual es concentrado y luego introducido dentro de un alto horno; junto con carburo cálcico, fundentes y coque,

para producir arrabio líquido, el cual se introduce en hornos convertidores para procesar el arrabio, eliminando las impurezas y descarburarlo por medio del afino (20, 21).

Existe una gran variedad de formas de identificar y clasificar los aceros, una de ellas es de acuerdo con el porcentaje de carbono; en este sentido los aceros se clasifican en: **aceros hipoeutectoides**, si su porcentaje de carbono es inferior al correspondiente al punto eutectoide en un diagrama Hiero - carbono, o sea menor al 0,78 % y en **aceros hipereutectoides**, si su porcentaje de carbono es superior al punto eutectoide y los **aceros eutectoides** que tienen la composición eutectoide (0,78 % de carbono). Otra clasificación de los aceros se hacer de acuerdo con el contenido de carbono en el acero (aceros de bajo carbono, medio carbono y alto carbono); también se puede clasificar de acuerdo con el contenido de los elementos de aleación (aceros de baja aleación, media aleación y alta aleación) (19- 22).

2.8.1. Acero al carbono

Alrededor del 90 % de todos los aceros son aceros al carbono. Estos aceros contienen desde 0,005 % a 1,20 % de carbono, además de menos del 1,65 % de manganeso, 0,60 % de silicio y 0,60 de cobre. El acero se puede fabricar en varios tipos de hornos como los hornos de arco eléctrico, hornos de inducción, hornos convertidores y hornos de combustión. Además los aceros pueden terminarse o desoxidarse como acero efervescente, semi-efervescente, calmado, semi-calmado y desoxidado al vacío. Tanto el tipo de horno usado, como el proceso de desoxidación afectan las características y propiedades del acero. Sin embargo, el mayor cambio de propiedades lo determina el contenido de carbono; al aumentar el contenido de carbono también aumenta la resistencia a la tensión y su dureza. Entre los productos fabricados con aceros al carbono figuran máquinas, carrocerías de automóvil, la mayor parte de las estructuras de construcción de acero, cascos de buques, somieres y horquillas entre otros, siendo los aceros de bajo carbono los más producidos por su relativa buena resistencia a la tensión y buena soldabilidad. Dependiendo de los niveles de carbono, los aceros al carbono son clasificados en tres grupos, así: (20, 21).

- Bajo carbono - hasta 0,25 % de carbono;
- Acero de medio carbono - de 0,25 % hasta 0,6 % de carbono;
- Acero de alto carbono - de 0,6 % hasta 2,00 % de carbono.

2.8.2. Aceros de baja aleación

Estos aceros contienen baja cantidad de elementos de aleación (menor al 5 %) tales como: Mn, Si, Al, Ni, Mo, Ti, W, V y Zr entre otros; los cuales son adicionados con el fin de obtener mejoras considerables en sus propiedades. Este tipo de materiales han sido desarrollados y utilizados para requerimientos especiales donde no es posible utilizar aceros al carbono corrientes con poca capacidad de endurecimiento. Al aumentar el contenido de elementos aleantes se consiguen varias mejoras tales como: aumentar el grado de endurecimiento, aumentar su resistencia al desgaste, proporcionar resistencia al impacto, lograr buena maquinabilidad incluso con alta durezas, mejorar las propiedades mecánicas en altas temperaturas o muy bajas y lograr una resistencia a la corrosión superior a la de un acero al carbono ordinario. Estos aceros son capaces de producir propiedades mecánicas con límites de fluencia un 50 % mayores y resistencia última un 40 % más altos que los aceros al carbono corrientes con al menos la misma ductilidad y resistencia al impacto que los materiales sin aleación. Los aceros de baja aleación son utilizados en herramientas de máquina, turbinas, válvulas y fijaciones rieles, automóviles, escavadoras, equipo para procesos químicos, maquinaria de pulpa de papeles, equipos de refinería, maquinaria de telas, en varios tipos de equipos marinos y en el campo aeronáutico, entre otros (20, 21).

2.8.3. Aceros de media aleación

Los aceros de media aleación son definidos como aquellos que poseen porcentajes de elementos aleantes entre 5 % y 10 % y el porcentaje de Mn varían entre 1,20 % y 1,65 % de acuerdo al contenido de C. Presentan características semejantes a las de los aceros de baja aleación, sin embargo requieren mayores cuidados en su fabricación y al ser soldados (20, 21).

2.8.4. Aceros de alta aleación

Los aceros de alta aleación contienen más del 10 % de elementos de aleación, además de los cinco elementos: carbono, silicio, manganeso, fósforo y azufre; contienen otros elementos importantes como el cromo, níquel, molibdeno, vanadio, tungsteno, cobalto, niobio y boro entre otros., que sirven para mejorar sus características fundamentales. La influencia que ejercen estos elementos es muy variada como: aumentar la dureza y la resistencia mecánica, disminuir el peso (consecuencia del aumento de la resistencia), conferir resistencia a la corrosión, aumentar la resistencia al calor, aumentar la resistencia al desgaste, mejorar las propiedades eléctricas y magnéticas. Con estos aceros es posible fabricar piezas de gran espesor, con resistencias muy elevadas en el interior de las mismas. En elementos de máquinas y motores se llegan a alcanzar grandes durezas con gran tenacidad. Es posible fabricar mecanismos que mantengan elevadas resistencias, aún a altas temperaturas. Hay aceros inoxidable que sirven para fabricar elementos decorativos, piezas de máquinas y herramientas, que resisten perfectamente a la acción de los agentes corrosivos. Por los altos niveles de elementos de aleación, se recomienda tomar prácticas y cuidados especiales cuando se sueldan estos aceros. Entre los aceros de alta aleación más importantes se encuentran los aceros austenítico al manganeso, aceros inoxidable, aceros resistentes al calor y aceros herramienta entre otros. En la figura 2.21 se observan elementos fabricados en aceros y algunas de sus formas.



Figura 2.21. Elementos fabricados en aceros y algunas de sus formas (24)

2.8.4.1. Aceros inoxidables

Los aceros inoxidables contienen cromo entre el 10 % y el 30 %, en donde el cromo es un metal reactivo que se combina con el oxígeno para formar una película superficial de óxido de cromo (cromia- Cr_2O_3) sobre el acero que lo aísla del medio agresivo. Esta fina capa de cromia es invisible al ojo, ya que tiene el mismo color del metal base. Esta capa es densa (no porosa), continua, adherente, tenaz, impermeable y autoregenerante. A esta última situación se la denomina pasivación y la película formada es inerte frente a las condiciones oxidantes de la atmósfera terrestre, por lo que son resistentes a la corrosión, a los ácidos y álcalis y a la oxidación a temperaturas elevadas. Hay un número importante de distintos aceros inoxidables que involucra a más de 130 clases de aceros y su resistencia a la corrosión, propiedades mecánicas y costo varía en un rango muy amplio, por esa razón es importante especificar el acero inoxidable más apropiado para una dada aplicación. El costo se eleva entre 5 y 10 veces el de un acero al carbono.

En los aceros inoxidables, la acción de los elementos aleantes como Cu, Al, Si, Ni, Mo, Nb, Ti es muy importante y depende del porcentaje que de estos contengan para aumentar su resistencia a la corrosión, directa o indirectamente, en condiciones específicas. El cromo es el elemento aleante que más influye en la resistencia a la oxidación de los aceros inoxidables. Un 12 % de cromo ya impide la corrosión ocasionado por el aire húmedo del ambiente. Para la oxidación a altas temperaturas se puede necesitar hasta un 30 % de Cr. El Níquel mejora la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables y es el responsable de que algunos de estos aceros presenten una estructura austenítica a temperatura ambiente. El Molibdeno mejora la resistencia a la oxidación a altas temperaturas. Los aceros inoxidables se dividen de acuerdo con su microestructura en cinco grupos: ferríticos, martensíticos, austeníticos, duplex y endurecibles por precipitación. (21-24).

Aceros inoxidables ferríticos: Se caracterizan por su estructura ferrítica a cualquier temperatura, por esta razón no hay posibilidad de regeneración del grano y la recristalización sólo es posible mediante una deformación plástica en frío, previo recocido

o mediante una deformación en caliente, por esta razón casi la mitad de este tipo de aceros es producido en placas, las que se terminan con laminados en frío. Se utiliza en utensilios de cocina, partes ornamentales para autos, etc. Son atractivos porque proporcionan buena resistencia a la corrosión y a la oxidación a alta temperatura y son más baratos que los austeníticos, además poseen buena resistencia a la corrosión por picadura y a la corrosión bajo tensión. Sin embargo, tienen varias limitaciones, entre las que se destacan, su pobre deformación al ser estirado, su bajo coeficiente de acritud (endurecimiento por deformación), y una moderada deformación uniforme. Tienen una fuerte reducción de la resistencia al impacto al disminuir la temperatura. La temperatura de transición dúctil-frágil disminuye fuertemente al disminuir el % de C, es sensible a las entallas, por tal motivo se usan en estado recocido. En estos aceros, cuando el contenido de cromo aumenta, la resiliencia disminuye. Se identifican por tener una composición de hasta un 11 % a 30 % de Cr y carbono máximo de 0,2 %. Los aceros inoxidable ferríticos tienen un costo relativamente bajo porque no contienen níquel. Se usan principalmente como materiales de construcción de tipo general cuando se necesita su resistencia especial a la corrosión y al calor. La presencia de los carburos en este acero reduce en cierto grado su resistencia a la corrosión. En fechas más recientes se han desarrollado nuevos compuestos ferríticos con muy bajos niveles de carbono y nitrógeno, con lo cual ha mejorado su resistencia a la corrosión (24). La composición típica de algunos de estos aceros se presenta en la tabla 2.1.

Al calentar un acero inoxidable ferrítico comercial arriba de 900 °C, que contiene C y N, y luego enfriarlo a temperatura ambiente, se produce una severa fragilización y pérdida de resistencia a la corrosión, causada por la precipitación de carburos y nitruros ricos en Cr en los límites de grano, como por ejemplo $(Cr,Fe)_7C_3$ y/o $(Cr,Fe)_{23}C_6$. Estos carburos y nitruros disminuyen fuertemente el contenido de Cr en las regiones vecinas a los límites de grano, quedando estas regiones desprotegidas para resistir la corrosión. Estos precipitados pueden formarse durante la soldadura o debido a tratamientos térmicos a alta temperatura. Este problema se puede resolver bajando los contenidos de C y N a niveles de 0,002 % C y 0,0095 % N. También es posible remediarlo agregando Ti o Nb, estos son fuertes formadores de carburos y evitan la formación de carburos de Cr, previniéndose así las

zonas desprotegidas. La resistencia a la corrosión aumenta con un mayor contenido de Cr de 16 % a 28 %, por otra parte, la adición de un 2 % de Mo mejora la resistencia a la corrosión por picadura, lo que es muy deseable, ya que este tipo de corrosión es muy dañina, atacando localmente y en forma rápida (18).

Tabla 2.1. Composición química de algunos aceros inoxidable ferríticos (25, 26)

Nombre AISI-SAE	% Cr	% C	% Si	% Mn	% Otros elementos
405	11,5-14,5	0,08	1	1	0,2 Al
409	10,5-11,75	0,08	1	1	0,5 Ti
429	14-16	0,12	1	1	
430	16-18	0,12	1	1,5	0,6 Mo
436	16-18	0,12	1	1	0,75-1,25 Mo
442		0,20	1	1	
446	25	0,20	1	1,5	0,25 N

Aceros inoxidable martensíticos: Estos aceros son aleaciones de Fe-Cr con contenido entre el 12 % y 17 % Cr y con un contenido de carbono entre el 0,12 % y 1,2 %. La relación entre C y Cr debe ser tal que puedan ser austenizados, es decir, que al ser calentados se entre al campo de austenita, para luego producir una microestructura martensítica por medio del temple. Estos aceros pueden ser templados y revenidos para lograr resistencias de fluencia en el intervalo de 550 MPa a 1860 MPa. El contenido de Cr les da gran templabilidad, esto permite que puedan ser templados al aire, aún en secciones grandes. Estos aceros tienen rigidez y dureza, pero la resistencia a la corrosión es mucho menor que los aceros inoxidable ferríticos y austeníticos.

La mayoría contienen sólo el mínimo requerido de Cr (12 %), para su pasividad en ambientes húmedos, ya que si se añadiera más Cr, se promovería la formación de ferrita a

expensas de la austenita, la cual es necesaria para la formación de la martensita. Sólo cantidades limitadas de otros aleantes, como el Ni pueden ser adicionadas, esto debido a que la transformación de austenita a martensita se ve inhibida. El acero martensítico 440C es el de más alta dureza entre los aceros resistentes a la corrosión. En la tabla 2.2 se muestra la composición química de algunos aceros inoxidable martensíticos.

Tabla 2.2. Composición química de algunos aceros inoxidable martensíticos (25, 26)

Nombre AISI-SAE	% Cr	% C	% Si	% Ni	% Mn	% Mo
403	11,5-13	0,15	0,5	-	1,0	
410	11,5-13	0,15	1,0		1,0	---
414	11,5-13,5	0,15	1,0	1,25-2,5	1,0	
416	12-14	0,15	1,0	--	1,25	0,6
420	12-14	0,15	1,0		1,0	---
431	15-17	0,2	1,0	1,25-2,5	1,0	
440A	16 - 18	0,6 a 0,75	1,0		1,0	0,75
440B	16 - 18	0,75 a 0,95	1,0		1,0	0,75
440C	16 - 18	0,95 a 1,2	1,0		1,0	0,75
501A	6-8	0,15	0,5-1,0		0,3-0,6	0,4-0,65
502	4-6	0,10	1,0		1,0	0,4-0,65
503	6-8	0,15	1,0		1,0	0,45-0,65
504	8-10	0,15	1,0		1,0	0,9-1,1

Aceros inoxidable austeníticos: Los aceros inoxidable austeníticos son esencialmente aleaciones ternarias de Fe, Cr y Ni, que contienen entre 16 % y 25 % Cr y de 7 % al 20 % Ni. El níquel tiene una estructura FCC, que estabiliza la estructura austenítica a temperatura ambiente. Debido a su estructura austenítica, estos aceros no son magnéticos y poseen alta

resistencia al impacto a bajas temperaturas. Estos aceros tienen alta moldeabilidad y normalmente mayor resistencia a la corrosión que los aceros inoxidable ferríticos y martensíticos, porque los carburos pueden conservarse en solución sólida mediante el enfriamiento rápido a partir de altas temperaturas. En estos aceros inoxidable se aumentan las cantidades de elementos de aleación a medida que el ambiente se vuelve más corrosivo (por temperatura o por ácidos más fuertes). Cuando estas aleaciones se soldan o enfriaran lentamente a partir de altas temperaturas en el rango de 870 °C a 600 °C, pueden volverse susceptibles a la corrosión intergranular porque se precipitan los carburos de cromo en los límites del grano. Esta dificultad se puede evitar hasta cierto punto si se reduce el contenido máximo de carbono en la aleación a cerca de 0,03 % de C. Son fácilmente soldables si se toman las precauciones del caso y pueden ser endurecidos sólo por trabajo en frío o por solución sólida. Su desventaja es su alto costo y su susceptibilidad a la corrosión bajo tensión (25). La composición química de algunos aceros inoxidable austeníticos típicos se muestra en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Composición química de algunos aceros inoxidable austeníticos (25, 26)

Nombre AISI-SAE	% Cr	% Ni	% C	% Mn	% Mo
302	17-19	8-10	0,15	2,0	
304	18-20	8-10	0,08	2,0	
310	24-26	19-22	0,25	2,0	
316	16-18	10-14	0,08	2,0	2-3
304L	18-20	8-10	0,03	2,0	
316L	16-18	10-14	0,03	2,0	2-3

Cuando se especifican valores de carbono inferiores a 0,03 % se le agrega L al código o nombre del acero (AISI-SAE 304L y AISI-SAE 316L),” L” es la abreviatura de *Low Carbon* en inglés. A veces se le adiciona elementos de aleación estabilizantes del carbono,

como el Titanio (AISI-SAE 321) o Niobio (AISI-SAE 347) para impedir la formación de carburos de cromo durante el servicio o el procesamiento a altas temperaturas. El carbono se combinará preferiblemente con el Ti o con el Nb, permitiendo al Cr seguir en solución sólida en el hierro para impartir resistencia a la corrosión. Los aceros inoxidable tipo AISI-SAE 321 y AISI-SAE 347 son denominados aceros inoxidables estabilizados.

Aceros inoxidables duplex: Son aleaciones cromo, níquel y molibdeno, aunque contienen otros elementos como N, Cu, W y Si; poseen una estructura mixta de ferrita y austenita, siendo que la cantidad de cada fase es función de la composición química y del tratamiento térmico; la austenita confiere ductilidad y la ferrita resistencia a la corrosión bajo esfuerzo - *Stress Corrosion Cracking* (SCC). El Mo hace más resistente a la capa pasivante y mejora la resistencia al picado – *pitting*. Estos materiales presentan valores de límite de resistencia, límite de fluencia, y resistencia a la corrosión bajo tensión mayores que los aceros inoxidables austeníticos. Los aceros Duplex son usados en las condiciones más severas de temperatura y contenido de cloruros, donde los Inoxidables austeníticos sufren SCC, *Pitting* y *Crevice Corrosion* (corrosión en grietas). Estas aleaciones son magnéticas, no pueden ser endurecidos por tratamientos térmicos y tienen buena soldabilidad. La estructura dúplex mejora la resistencia a la corrosión bajo tensión en ambientes con cloruros (25).

Aceros inoxidables endurecibles por precipitación - PH: Estos aceros ofrecen una alternativa a los aceros inoxidables austeníticos cuando se desea asociar elevadas características mecánicas y de maquinabilidad. La resistencia mecánica es obtenida por endurecimiento, debido al tratamiento térmico de envejecimiento, deformación y por la formación de martensita. Son aceros entre 12 % y 18 % de Cr y entre 4 % y 9 % de Ni además de los aleantes que producen el endurecimiento por precipitación como: Mo, Ti, N, Cu, Al, Ta, Nb, B, y V. Los hay de estructura austenítica, martensítica y semiaustenítica. Se los utiliza en ciertas aplicaciones a alta temperatura como pueden ser intercambiadores de calor y tubos del sobrecalentador de calderas de vapor (25).

2.8.4.2. Aceros para herramientas

Estos aceros se emplean en la fabricación de útiles o herramientas, para corte, presión o arranque de viruta; por tal motivo, se diseñan para que tengan alta dureza y durabilidad bajo estas severas condiciones de servicio. El diseño de los aceros aleados para herramientas se basa en gran parte, en aceros aleados con elementos fuertes formadores de carburos, como Cr, Mo, W y V. Los aceros para herramientas tienen un contenido en carbono superior a 0,30 %, aunque en algunas ocasiones se usan aceros de bajo carbono para la fabricación de ciertas herramientas. Hay que tener mucho cuidado durante los tratamientos térmicos para estos aceros herramientas, ya que son un poco aleados y poder alcanzar un balance apropiado de carburos aleados en una matriz de martensita revenida. Los distintos tipos de aceros para herramientas se categorizan dentro de una serie de clases, en concordancia con la clasificación que realiza la AISI (*American Iron and Steel Institute*) y la SAE (*Society of Automotive Engineers*). Se identifican por una letra que representa la química, una característica única o el uso de esa clase de acero. A continuación en la tabla 2.4, se presentan la clasificación y el tipo de aceros para herramientas que existen.

2.9. Aceros de construcción mecánica

Son aceros de medio o bajo contenido de carbono con baja aleación, son muy dúctiles, tienen baja templabilidad, así como su resistencia al desgaste. La soldabilidad de estos aceros está en función del contenido de carbono y son utilizados en la construcción de piezas mecánicas que forman parte de máquinas, herrajes, ejes, pernos, tornillería y equipos industriales entre otros usos. En el sistema AISI-SAE, los aceros de construcción mecánica se nombran con cuatro dígitos. El primer dígito especifica el elemento aleante principal, el segundo dígito indica el % del elemento aleante principal y los dos últimos dígitos dan la cantidad de carbono presente en la aleación (en centésimas). Las convenciones para el primer dígito son: (18)

1 – MANGANESO

2 – NÍQUEL

3 - NÍQUEL-CROMO, principal aleante el cromo

4 – MOLIBDENO

5 – CROMO

6 - CROMO-VANADIO, principal aleante el cromo

8 - NÍQUEL-CROMO-MOLIBDENO, principal aleante el molibdeno

9 - NÍQUEL-CROMO-MOLIBDENO, principal aleante el níquel

Tabla 2.4. Clasificación y el tipo de aceros para herramientas

GRUPO	SÍMBOLO	TIPO
Templados en agua	W	Porcentaje de C entre 0,6 y 1,4, usado para herramientas de corte y cuchillería.
Resistentes al impacto	S	Usado para herramientas sometidas a impacto y tiene buena tenacidad
Trabajo en frío	O	Templados en aceite, para herramientas de trabajo en frío como matrices.
	A	Media aleación, templados al aire, usados para resistir impacto y abrasión como en matrices de estampado y extrusión.
	D	Alto carbono y alto cromo
Trabajo en Caliente	H	H1- H19, base cromo H20-H39, base tungsteno H40-H59, base molibdeno
Alta velocidad	T	Base tungsteno, usado para brocas y matrices
	M	Base Molibdeno
Moldes	P	Acero para moldes P1-P19 bajo carbono
Propósitos específicos	L	Baja aleación
	F	Carbono y tungsteno

No hay aceros numerados 7xxx porque estos aceros resistentes al calor prácticamente ya no se fabrican. En caso que el primer número sea 1 se trata de un acero al carbono; si el dígito siguiente es el 0, o sea que la designación es 10xx, se trata de un acero ordinario al carbono, así: 1030 significa un acero ordinario al carbono con 0,30 % C. Algunas variantes se pueden representar en letras según: (18)

L = Plomo.

B = Boro.

E = Horno Eléctrico.

H = Endurecimiento Garantizado.

Dependiendo de los elementos de aleación presentes en el acero y del tratamiento térmico al cuál va a ser sometido, los aceros para ingeniería se dividen en: (18)

2.9.1. Aceros al carbono para cementación

Utilizados para la fabricación de bulones, ejes, cadenas, bujes, remaches, tuercas, tornillos racores, eslabones para cadenas, pasadores, y en general en elementos de ingeniería que requieran gran tenacidad conjuntamente con una baja resistencia mecánica. Ejemplos AISI-SAE 1010, AISI-SAE 1016, AISI-SAE 1020.

2.9.2. Aceros al carbono para temple y revenido

Utilizado para la fabricación de palancas para frenos, cigüeñales, herramientas agrícolas, productos estampados y forjados en la industria automotriz, y en general en piezas de ingeniería que requieran dureza y tenacidad. Ejemplo AISI-SAE 1035, AISI-SAE 1040, AISI-SAE 1045.

Aceros al carbono de alto manganeso: Son aceros usados en la fabricación de piñones, bujes, casquillos, partes para la industria petrolera, acoples, ejes de transmisión. Ejemplo AISI-SAE 1518.

Aceros aleados para cementación: Son usados en la fabricación de engranajes, ejes de leva, cigüeñales, tornillos sinfín, cuerpos de válvulas. Ejemplo AISI-SAE 8620, AISI-SAE 8615.

Aceros aleados para temple y revenido: Usados en la fabricación de ejes, reductores, engranajes, transmisión, espárragos, bielas, cinceles, tijeras, rotores de turbinas, y en general piezas que requieran alta resistencia mecánica. Ejemplo AISI-SAE. 4140, AISI-SAE 4340, AISI-SAE 5160.

3. DISEÑO DE JUNTAS Y SÍMBOLOS DE SOLDADURA

El personal que trabaje en el área de la soldadura, tiene la necesidad de entender y emplear correctamente la terminología y simbología de soldadura, para lograr una comunicación efectiva entre el personal relacionado con los procesos de soldadura y operaciones afines, para que se pueda cumplir efectivamente sus actividades, funciones y responsabilidades. Debido a que es indispensable el uso correcto y preciso de estos términos, los institutos encargados de las aplicaciones y el desarrollo de la soldadura (AWS), han preparado y publicado normas que establecen los términos estandarizados a emplearse en planos y la definición de los mismos.

3.1. Diseño de juntas

La junta es el espacio existente entre las superficies que van a ser unidas por soldadura. Durante la selección y el diseño de la junta más adecuada para cada trabajo, se deben considerar varios factores, como el tipo de cargas que va a soportar, ya que el esfuerzo puede ser de tensión, compresión, flexión, fatiga o impacto; también se considera si la carga es estática, dinámica, de impacto o variable, dirección de la carga con relación a la junta, tipo de material base, espesor de la pieza, proceso de soldadura, posición de soldeo, facilidad de acceso, tipo de empalme, geometría de la construcción, costo de preparación y adaptabilidad para fabricar el producto. Cada uno de esos factores se deben considerar independientemente, ya que podría ocasionar que no se pueda soldar la pieza. Una mala preparación de la junta puede afectar la resistencia de la unión o aumentar el consumo de material de aporte y el tiempo de trabajo. El diseño de la junta identifica la forma, las dimensiones y la configuración de la junta. Las especificaciones del cordón de soldadura y diseño son responsabilidad del ingeniero de diseño o proyectista, aunque queda la aplicación del cordón de soldadura que está a cargo del personal de fabricación, el cual debe interpretar muy bien las especificaciones del proyectista, por tal motivo es muy

importante el conocimiento de la terminología de juntas soldadas, para que haya una buena comunicación entre las personas que trabajan en este campo, para que se puedan resolver más fácilmente los problemas de soldadura presentados durante el proceso de fabricación. El inspector de soldadura tiene que conocer perfectamente estos aspectos de las comunicaciones. Los tipos básicos de uniones utilizados en soldadura son: unión a tope, traslape (solape), en ángulo interior, en ángulo exterior, sobre cantos o de reborde (ver figura 3.1). Cada unión tiene ventajas y limitaciones y la efectividad de la soldadura depende tanto del tipo de junta como de la habilidad del soldador para realizar un cordón de calidad. El propósito de una junta soldada es unir las partes entre sí, para que se distribuyan los esfuerzos de tensión, compresión, dobléz, torsión y cizalladura.

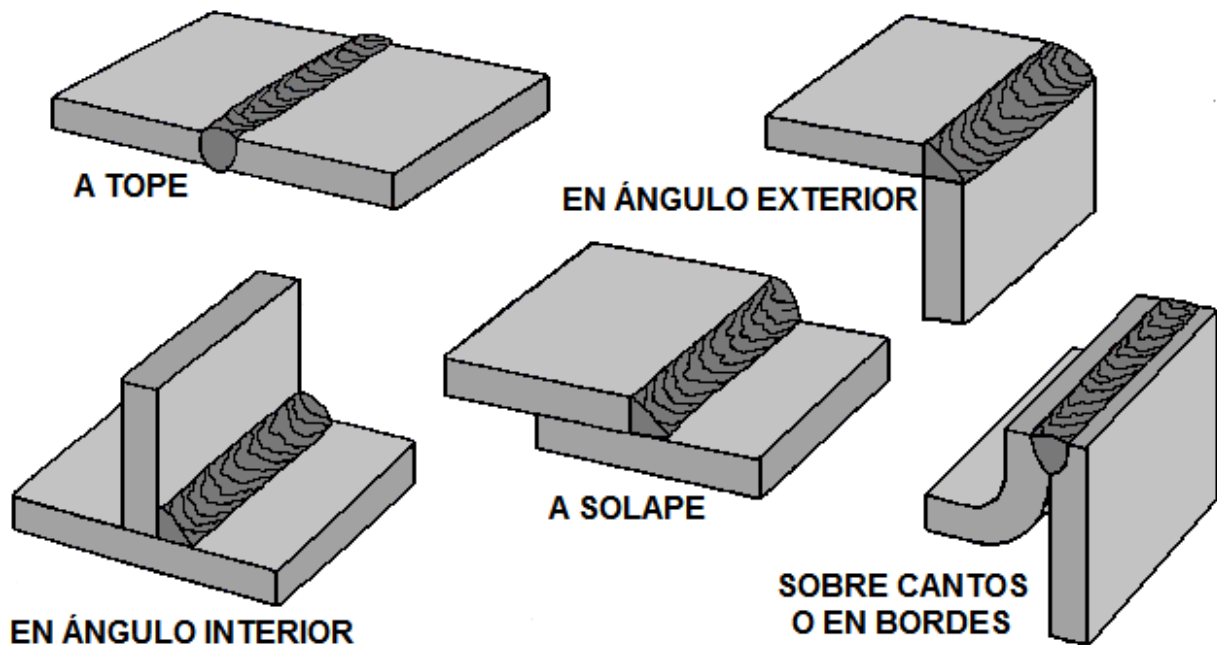


Figura 3.1. Tipos de uniones soldadas básicas (8, 18, 27)

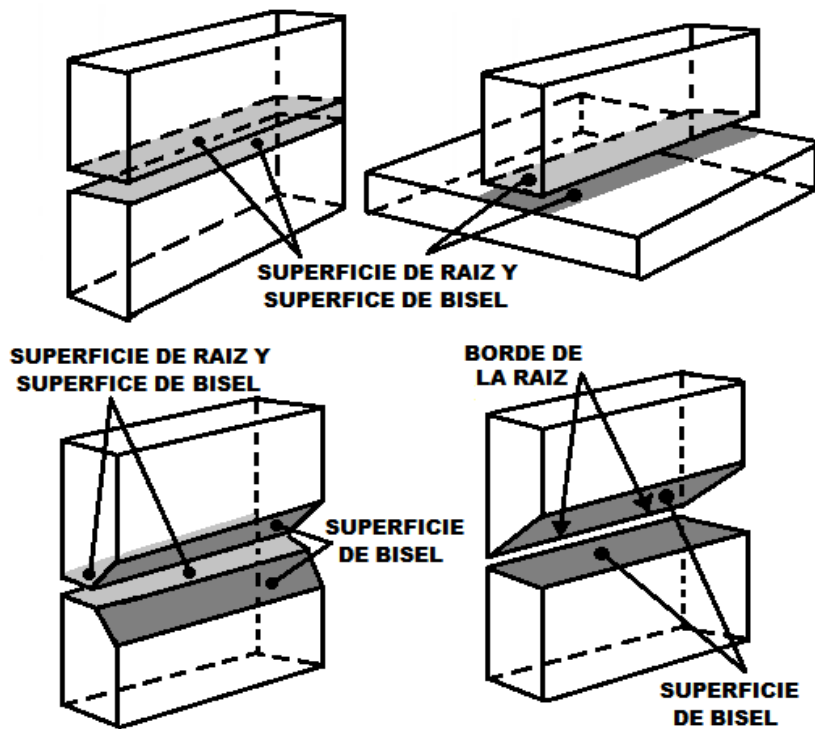
3.2. Partes de la junta soldada

La geometría de la unión soldada incluye varios aspectos como la raíz de la junta, superficie de la raíz, borde de la raíz, apertura de raíz, superficie del bisel, ángulo de bisel,

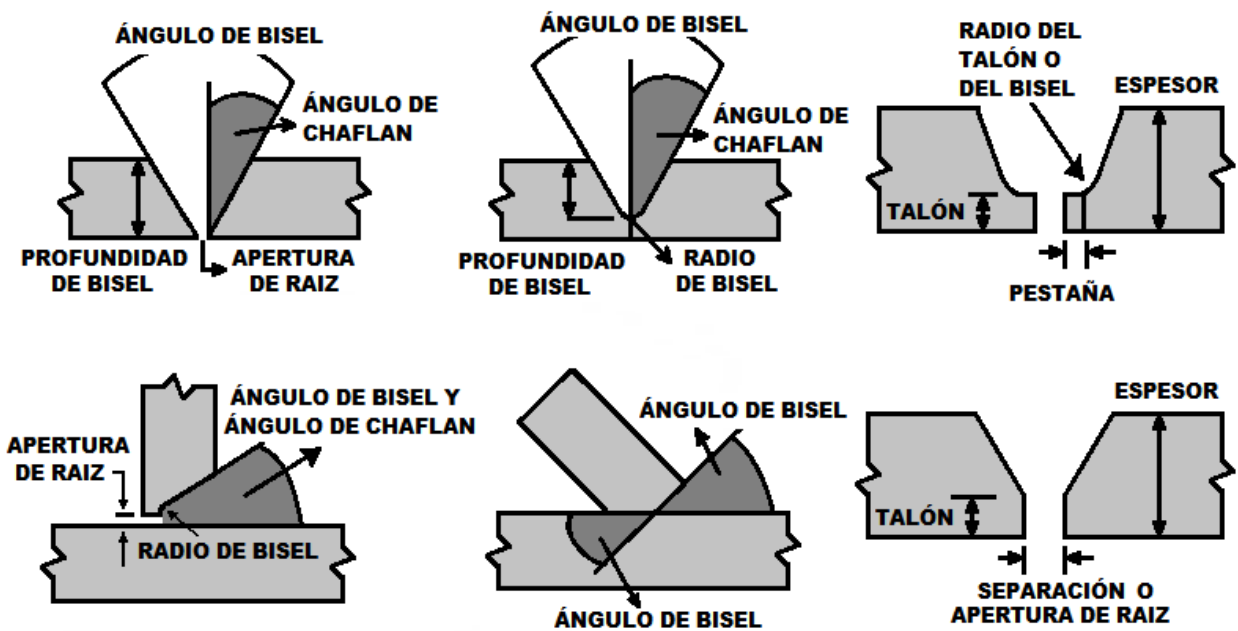
radio del bisel, chaflán y ángulo del chaflán. Definido el tipo de junta, es necesario describir el diseño de junta requerido, para que el personal de soldadura e inspección sea capaz de identificar los aspectos geométricos de la junta. La nomenclatura asociada con la superficie de bisel, superficie de la raíz y borde de la raíz es identificada en la figura 3.2a. Superficie de bisel es la superficie del componente (bisel). La abertura de raíz es descrita como la separación entre las piezas de trabajo en la raíz de la junta. El chaflán es la preparación de un borde angular. El ángulo de chaflán es el ángulo entre el chaflán y el plano perpendicular a la superficie de la junta. El ángulo de bisel es todo el ángulo, incluido los dos chaflanes (bisel) entre las piezas de trabajo. Para una soldadura con bisel en $1/2 V$ simple, el ángulo de chaflán y el ángulo de bisel son iguales. En la figura 3.2b, se muestra la terminología utilizada en el diseño de juntas. Estos elementos son a menudo variables esenciales en los procedimientos de soldadura y se requiere que el personal de soldadura los verifique para determinar si cumplen con las especificaciones de plano u otros documentos (3).

3.2.1. Tipos de soldaduras

Se pueden realizar diferentes uniones para diferentes tipos de soldaduras, en los cuales hay nueve categorías de soldadura asociada con símbolos de soldadura como: soldadura con bisel; soldaduras de filete; soldadura en tapón o ranura o en ojal; soldadura con espárragos (pernos); soldadura por puntos o soldadura por proyección; soldadura por costura; soldadura de reverso o respaldo; soldaduras de recargue y soldadura de componentes curvos. Con la variedad de geometrías de juntas y tipos de soldadura disponibles, el diseñador de soldadura puede elegir aquella que mejor cumpla con sus necesidades de diseño. Esta elección puede basarse en consideraciones como accesibilidad a la junta para soldar, tipo de proceso de soldadura empleado, conveniencia para el diseño de la estructura y costo de la soldadura. A continuación se describirá brevemente algunos tipos de soldadura.



a. Geometría de la junta soldada



b. Terminología de la juntas

Figura 3.2. Partes de la junta soldada y terminología de las juntas (3)

Soldadura de recargue: Es una soldadura de recuperación de piezas, en donde una pieza bien recuperada puede tener una vida útil superior a la pieza nueva original. En este

procedimiento se depositan una o varias capas de soldadura sobre la superficie que se quiere recuperar obteniendo la dimensión deseada. Generalmente, la última capa o las tres últimas capas son de material duro y resistente, para proteger la superficie de algún tipo de desgaste. Se considera como uno de los métodos más económicos para la reparación y mantenimiento de piezas, herramientas y maquinaria. La soldadura de recargue no se usa para unir partes, sino para depositar metal de relleno sobre la superficie

Soldadura con cordones en ángulo: Se utiliza para unir dos chapas o láminas situadas en distinto plano (ortogonales o superpuestas), ya sea uniones a solape en ángulo interno y exterior. El metal de relleno adquiere una forma aproximadamente triangular, ya que las dos superficies a unir forman un ángulo recto. Las soldaduras en ángulo o filete pueden ser sencillas o dobles, ya que se pueden soldar por uno o ambos lados, también pueden ser continuas o intermitentes. La preparación de los bordes depende del espesor de la pieza y el grado de penetración que se quiera obtener; se pueden utilizar bordes rectos, bordes en J y en doble J. El ángulo de avance suele ser de 60° aproximadamente y el ángulo de posicionamiento con la pieza es de 45° , que es la mitad del ángulo que forman las piezas a unir. En la figura 3.3 se observan diferentes tipos de uniones soldadas.

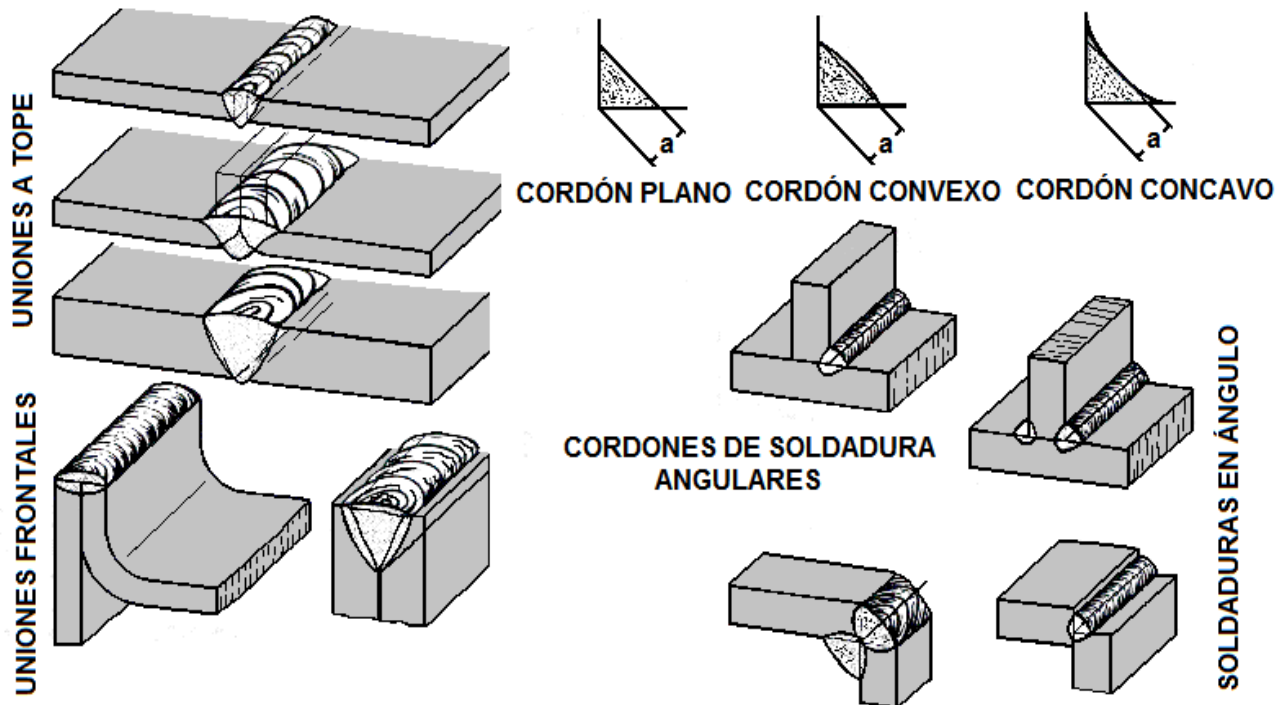


Figura 3.3. Diferentes tipos de uniones soldadas (7, 18, 28)

Soldadura a tope: Es la junta más utilizada y se realiza uniendo chapas situadas en el mismo plano, o sea una frente a la otra. Cuando se requiere una unión a tope empalmada, se debe conseguir una penetración completa y que la transición sea lo mejor posible entre los elementos soldados. La preparación de los bordes se hará de acuerdo con el espesor de la pieza a soldar y puede tener soldaduras a tope cuadradas o con bordes rectos I (hasta 4 mm de espesor), soldaduras a tope con bordes en V (de 8 mm a 20 mm de espesor), soldaduras a tope en V doble o con bordes en X (espesores superiores a 18 mm), soldaduras a tope con bordes en U (de 13 mm a 20 mm de espesor), doble U (espesores superiores a 20 mm) entre otros. En la figura 3.4, se observan diferentes preparaciones de los bordes para uniones soldadas.

La separación de las piezas varía de acuerdo al espesor de las mismas y el diámetro del electrodo a utilizar o el proceso de soldadura empleado. En una soldadura a tope de chapas de distinta sección, la chapa más gruesa se tiene que adelgazar en la zona de contacto, con pendientes menores al 25 %, para obtener una transición suave. La soldadura a tope no debe producir discontinuidad en la sección y su sobre espesor no puede ser mayor al 10 % del espesor de la chapa más delgada.

Soldadura de ranura, en tapón o en ojal: Las soldaduras con insertos y las soldaduras de ranura se utilizan para soldar láminas o placas planas superpuestas, depositando cordones de soldadura en el interior de ranuras o agujeros realizados sobre la placa superior; por su composición y por su comportamiento son similares a los remaches (29, 30).

Soldaduras de borde o en componentes curvos: Se utiliza para juntas a tope unida en el extremo, usualmente de espesores finos sin metal de aporte principalmente por los procesos oxi-acetileno o por soldadura de arco con electrodo de tungsteno y gas de protección (GTAW). El procedimiento de soldeo es crear un baño de fusión con el metal base y desplazarlo por toda la junta. El posicionamiento es similar a la posición horizontal, pero se hace el cordón de soldadura en avance y no en retroceso, para que la atmosfera inerte de la llama o del gas de soldadura proteja el baño de fusión. Es una soldadura hecha en por lo

menos un componente curvo, siendo representado en el símbolo, el uso de un componente o componentes curvos y no el tipo específico de soldadura requerido (29, 30).

TIPO DE CORDON	DESIGNACION	SIMBOLO	REPRESENTACION		TIPO DE CORDON	DESIGNACION	SIMBOLO	REPRESENTACION	
			FORMA DEL CHAFLAN	CORDON DE SOLDADURA				FORMA DEL CHAFLAN	CORDON DE SOLDADURA
CORDON DE SOLDADURA A TOPE	BORDES LEVANTADOS				CORDON DE SOLDADURA A TOPE	EN SEMI Y			
	EN I					EN K CON TALON			
	EN V					EN J			
	SOBRE BORDES RECTOS					EN DOBLE J			
	EN X				SOLDADURAS FRONTALES	FRONTAL PLANO			
	EN Y					FRONTAL CON ENTALLA			
	EN DOBLE Y					SOLDADURAS ANGULARES	ANGULAR		
	EN U				ANGULAR DOBLE				
	EN DOBLE U				ANGULAR EXTERIOR				
	EN SEMI V								
	EN K								

Figura 3.4. Tipos de preparación de juntas con sus cordones de soldadura (7, 18, 29)

Soldadura por espárragos (pernos): Se utiliza la energía almacenada en una batería de condensadores que se descarga a través de la punta de ignición del perno de soldadura en un periodo de tiempo extremadamente corto de 1 ms - 3 ms (0,001 s - 0,003 s). El perno se

apoya sobre la pieza de trabajo y con el contacto de esta punta se cierra el circuito y debido al incremento rápido de la corriente, la punta de ignición crea el arco principal y funde la base del perno y la pieza. El perno desciende y al contacto con la pieza el arco se extingue. El metal fundido se solidifica y une ambas piezas. Este método se aplica en el moldeado de chapa, en el diseño ornamental de metales y en la industria del automóvil (29).

La geometría de la junta es la forma y dimensiones de la unión, vista en la sección transversal antes de ser soldada y se puede basar en factores como: (18, 29, 30)

- La preparación debe ser uniforme a lo largo de la junta, en cuanto a biseles y separaciones, ya que cualquier falta de uniformidad, en la preparación de la junta, obliga al soldador a disminuir la velocidad de avance y a modificar la técnica operativa para adaptarse a las distintas preparaciones. En uniones a solape y en filete, las piezas deben acoplarse firmemente, sin separaciones en toda su longitud. En la figura 3.5 se observa cómo se hace la transición de una sección gruesa a una delgada.

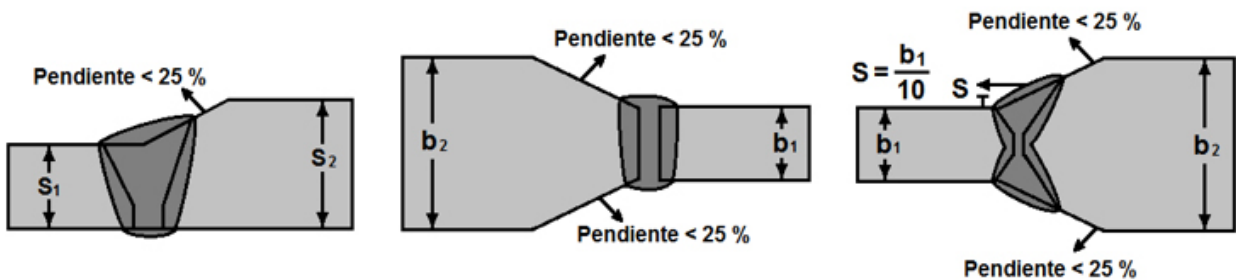


Figura 3.5. Transición de una sección gruesa a una delgada

- Para conseguir un cordón de forma correcta y con penetración adecuada se debe realizar una buena preparación de bordes con el ángulo correcto, ya que un ángulo de chaflán insuficiente dificulta la entrada del electrodo hasta el fondo de la junta, además si es profunda y estrecha puede quedar con falta de penetración, aumentando la sensibilidad al fisurado. Una abertura excesiva del chaflán conlleva a

un desperdicio de material de aporte aumentando los costos de fabricación. Se recomienda que los chaflanes tengan una abertura de $60^\circ (+10^\circ / -5^\circ)$.

- Una apertura excesiva desperdicia material de aporte, lo cual es costoso, además, cualquier aumento del ángulo en los bordes, con relación a los valores recomendados supone un aumento de los costos de fabricación, ya que hay un mayor consumo de material de aporte y se aumenta el tiempo para depositarlo. En la figura 3.6 se ven diferentes tipos de juntas y la secuencia de los cordones de soldadura.

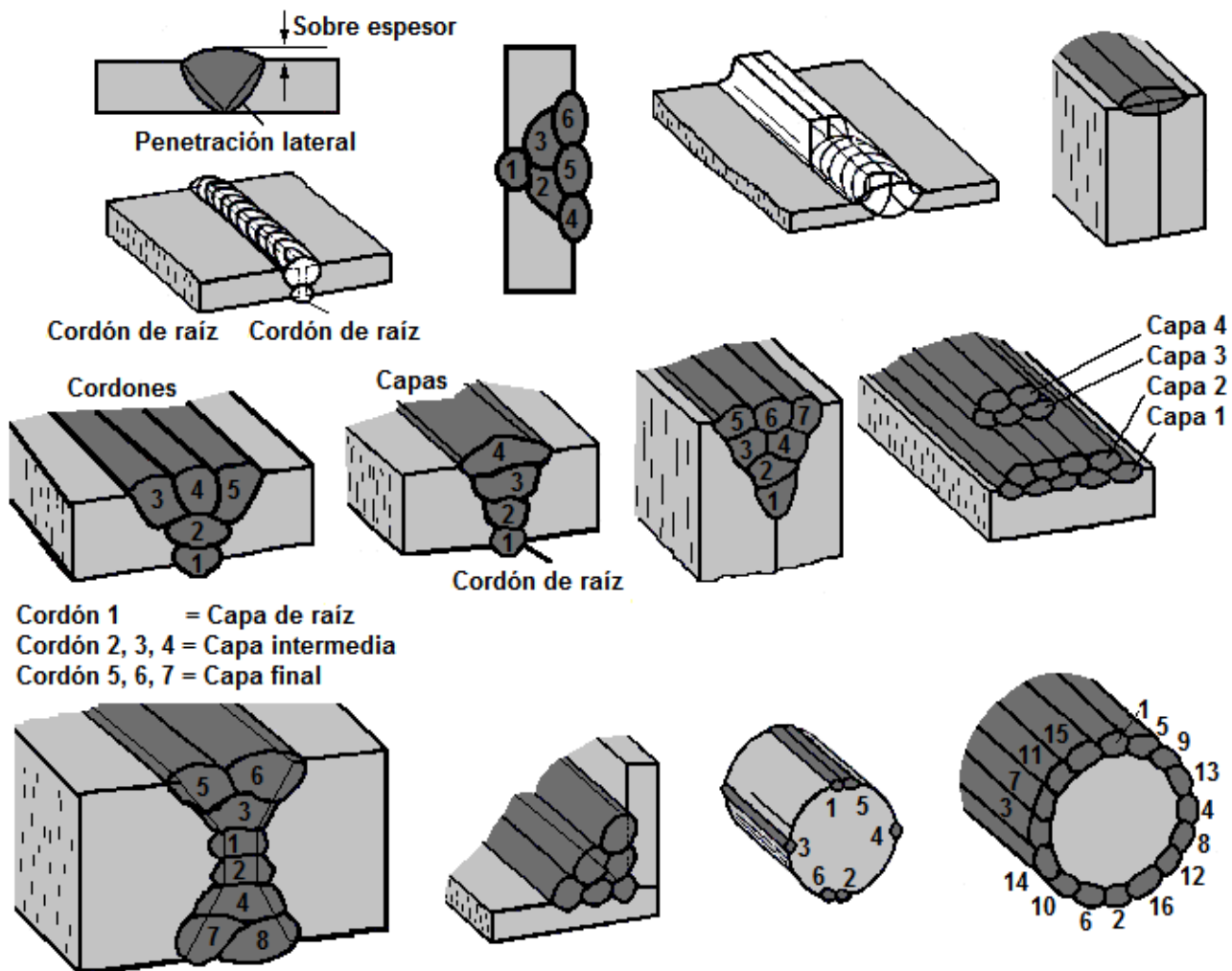


Figura 3.6. Construcción de la soldadura y el orden de los cordones (28)

- Realizar una penetración completa es necesario para que la junta soporte muy bien las cargas que se le apliquen, aunque la penetración completa depende de la habilidad del soldador. La preparación de los bordes con una separación adecuada es fundamental para que el soldador realice un buen trabajo.
- Para conseguir una unión de calidad, con buena velocidad de avance, se deben preparar los bordes con un talón de 3 mm aproximadamente, en caso contrario utilizar un soporte por el reverso. Las uniones a tope con bordes en X, pueden facilitar la preparación prescindiendo del talón y compensándolo con una separación de borde menor, por ejemplo de 3 mm a 2 mm.
- Para conseguir una penetración completa es necesario dejar una separación suficiente. Una junta soldada sin una penetración adecuada no será capaz de soportar las cargas que se apliquen; aunque la penetración correcta depende en gran medida de la habilidad del soldador, es siempre fundamental, la preparación de los bordes con una separación adecuada.

El personal de soldadura y de inspección de soldadura debe estar familiarizado con los términos asociados a las soldaduras terminadas. El conocimiento de estos términos ayuda en el proceso de comunicación y fortalece la habilidad del personal para interpretar la información de los símbolos de soldadura y localización de áreas de una soldadura que pueden requerir una limpieza o detalle post soldadura adicional. Los términos referidos a soldadura en bisel consisten en: superficie de soldadura (cara), pie de soldadura, raíz de soldadura, superficie de raíz, sobre espesor o refuerzo de soldadura y refuerzo de raíz. La cara de la soldadura es la superficie expuesta de una soldadura del lado del cual la soldadura fue hecha. El pie de soldadura es la unión de la soldadura entre la superficie de soldadura y el metal base. La raíz de soldadura es la superficie del cordón de raíz. Similar a la superficie de soldadura, es la superficie de raíz. El espesor de soldadura (refuerzo) es el metal de soldadura en exceso de la cantidad requerida para rellenar una junta. El sobre espesor de raíz es el refuerzo en la raíz el cual está al lado opuesto de la cara de la

soldadura. Sólo hay refuerzo de raíz cuando se realiza la junta soldada por un solo lado. Existe una gran cantidad de términos que describe el grado o ubicación de la fusión y la penetración. Durante la aplicación del cordón de soldadura, la superficie del bisel original es fundida, aumentando los límites del metal de soldadura. La frontera entre el metal de soldadura y el metal base es conocida como la interface de soldadura. La profundidad de fusión es la distancia desde la superficie de fusión hasta la interface de soldadura. La profundidad de la fusión es siempre medida en forma perpendicular a la superficie de fusión. La zona de fusión es el área de metal base fundido. La penetración de raíz es la distancia que el metal soldado ha fundido adentro de la junta más allá de la raíz de la junta (3). En la figura 3.7 se ven las diferentes partes del cordón de soldadura en bisel.

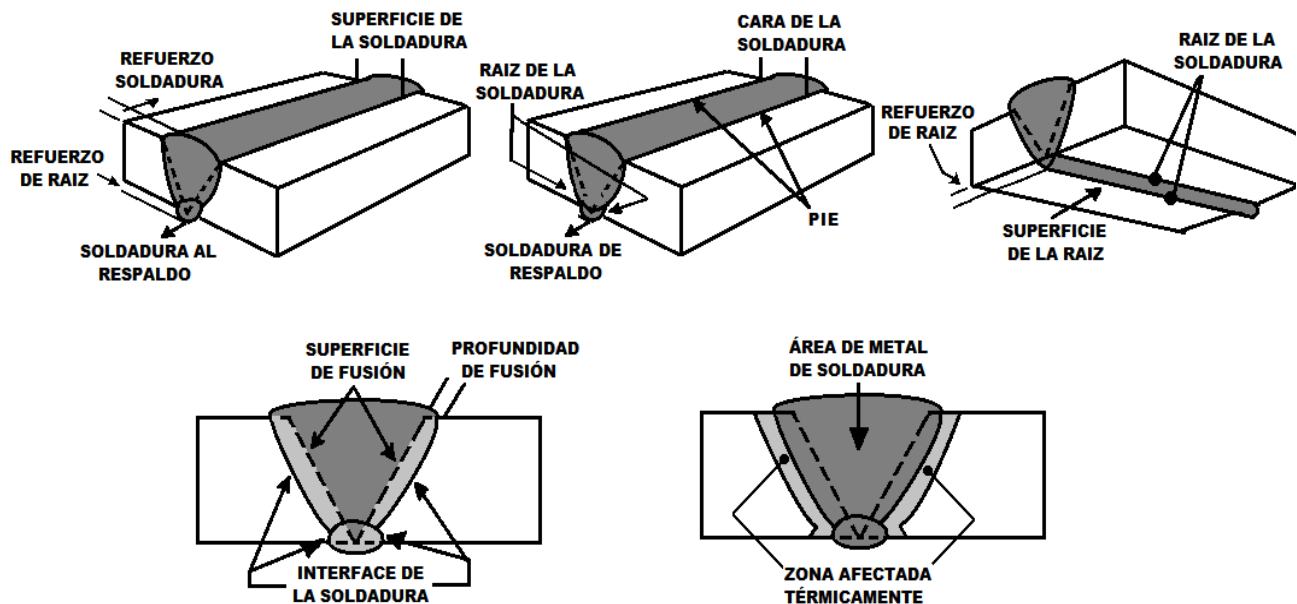


Figura 3.7. Diferentes partes del cordón de soldadura en bisel (3, 8)

El tamaño de la soldadura es la distancia desde la penetración de raíz hasta la superficie de soldadura, excluyendo el refuerzo de la soldadura. La zona afectada térmicamente es la porción del metal base que no ha sido fundida, pero cuyas propiedades mecánicas o microestructura han sido alterada por el calor de la soldadura o por el proceso de corte. En general, el término fusión se refiere a la fusión del metal de aporte y el metal base, o al del

metal base solamente. Penetración es un término que se refiere a la distancia que el metal de soldadura ingresó adentro de la junta. El grado de penetración alcanzado tiene un efecto directo en la resistencia de la junta y por eso es tenido en cuenta en el tamaño de la soldadura (3).

Soldadura al respaldo y soldadura de respaldo: Como sus nombres lo dicen, estas soldaduras están hechas en la parte de atrás de una junta soldada. Si bien se aplican en la misma posición, son depositadas en forma diferente. AWS A 3.0 describe que una **soldadura al respaldo** es una soldadura hecha en la parte de atrás de una soldadura con bisel simple, se aplica la soldadura al respaldo después de aplicar la soldadura normal”. Una **soldadura de respaldo** es un respaldo en forma de soldadura, la cual es depositada antes de soldar el lado frontal de la junta.

Estos términos son aplicados también a otros tipos como soldadura de filete y por recargue. Aunque la soldadura de filete también tiene su terminología para sus partes, como con la soldadura en bisel. La superficie de la soldadura de filete es conocida como cara de la soldadura. La unión de la superficie de soldadura con el metal base es el **pie de soldadura**. La máxima penetración del metal de soldadura adentro de la junta es la **raíz de soldadura**. La distancia desde la raíz de la junta, al talón de la soldadura de filete, son llamados **catetos o piernas** del cordón de soldadura, los cuales determinan el tamaño del cordón de soldadura. Los tamaños del cordón de soldadura se miden por la longitud de las piernas del triángulo rectángulo más largo que puede ser inscrito dentro de la sección transversal del cordón de soldadura. Otros tres aspectos dimensionales de la soldadura de filete son concavidad, convexidad y garganta. El tamaño de la soldadura de filete o angular, se tiene en cuenta la concavidad o convexidad del cordón de soldadura, ya que el refuerzo de soldadura tiene gran influencia en la resistencia a la fatiga.

El tamaño de soldadura de filete de lados iguales es la longitud del mayor triángulo isósceles que puede ser inscrito dentro de la sección transversal de la soldadura de filete y para soldaduras de filete con lados desiguales, el tamaño se define como la longitud del

mayor triángulo con ángulo recto que puede ser inscrito dentro de la sección transversal de la soldadura. La garganta de la soldadura tiene tres tipos diferentes que son la **garganta teórica**, que es la distancia desde el comienzo de la raíz de la junta medida perpendicularmente a la hipotenusa del triángulo mayor recto que puede ser inscrito dentro de la sección transversal de la soldadura de filete y es la cantidad mínima de soldadura especificada en el diseño del tamaño de la soldadura; la **garganta efectiva** es la distancia desde la raíz de la soldadura a la cara de la soldadura, menos cualquier convexidad de la cara de la soldadura, se debe tener en cuenta la penetración de la junta que pueda tener y la **garganta real**, que es la distancia más corta entre la raíz de la soldadura y la cara del filete de la soldadura, teniendo en cuenta la penetración de la junta y cualquier convexidad adicional que presenta la cara de la soldadura de filete. Para una soldadura de filete cóncavo, la garganta efectiva y la garganta real son iguales. En la figura 3.8 se observan las partes de una soldadura a filete.

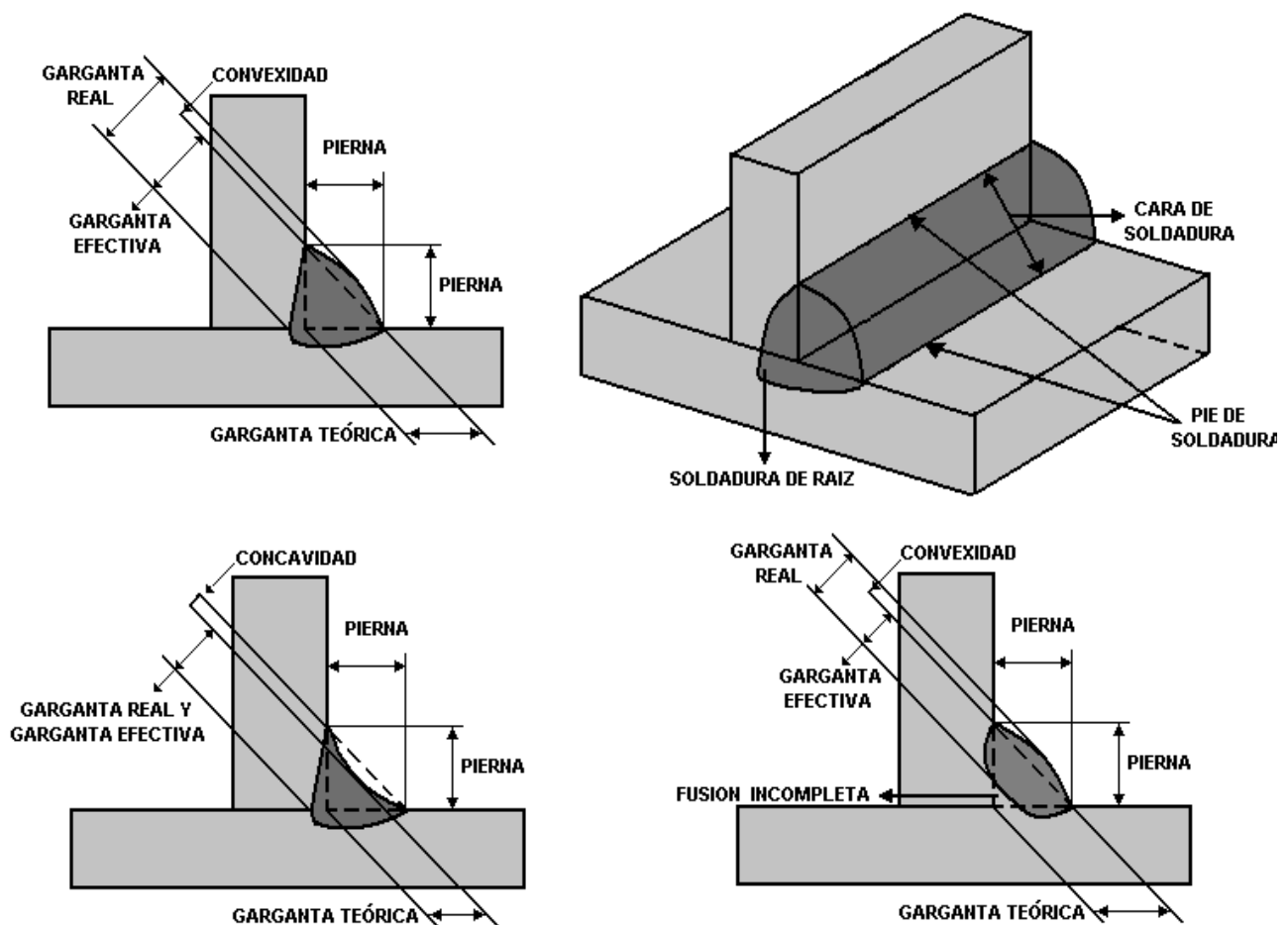


Figura 3.8. Partes de una soldadura en filete (7, 8, 18, 30)

Los tamaños del cordón de soldadura deben ser suficientemente largos como para transmitir la carga aplicada, pero el tamaño especificado del cordón de soldadura no debe ser excesivo con el fin de minimizar la distorsión de soldadura y los costos. La convexidad excesiva puede causar concentración de tensión en los pies de la soldadura, lo que puede resultar en un fallo prematuro de la articulación. En el control de calidad de los cordones de soldadura una vez terminados se deben medir el tamaño del filete o de las piernas, la garganta, convexidad, y concavidad, esta inspección se realiza con galgas, calibradores y lupas entre otros. Las esquinas de chapas donde coinciden los cruces de soldadura se deben recortar para evitar el cruce; nunca se puede ejecutar una soldadura a lo largo de otra ya realizada. Si la longitud del cordón de soldadura no supera los 500 mm, su ejecución se puede realizar de un extremo al otro; pero cuando el cordón supera los 500 mm, se aconseja ejecutarla en dos tramos, iniciando en el centro.

3.3. Posiciones de soldadura

Hay cuatro posiciones básicas para soldar como se puede ver en la figura 3.9: plana, vertical, horizontal y sobre cabeza. Estas posiciones de soldadura se pueden designar con un número, siendo el 1 para la posición plana, 2 para la horizontal, 3 para la vertical y 4 para la sobre cabeza; además hay dos posibilidades de aplicar la soldadura, una con platinas a tope y preparación de bisel en ranura, que se designa con letra (G) y la otra en filete que se designa con letra (F). Estas posiciones se usan para todos los procesos de soldadura y son independientes del proceso que se use. La posición horizontal es la más empleada, ya que permite una soldadura rápida y fácil de realizar. La soldadura sobre cabeza es la más difícil, debido a que el baño de metal tiende a caerse. La soldadura en vertical puede realizarse desde abajo hacia arriba (vertical ascendente) o de arriba hacia abajo (vertical descendente). Para espesores muy delgados, es más recomendable la soldadura descendente. La soldadura horizontal o en cornisa también es difícil de soldar, ya que el metal fundido de la soldadura tiene tendencia a caerse (3, 18, 30).

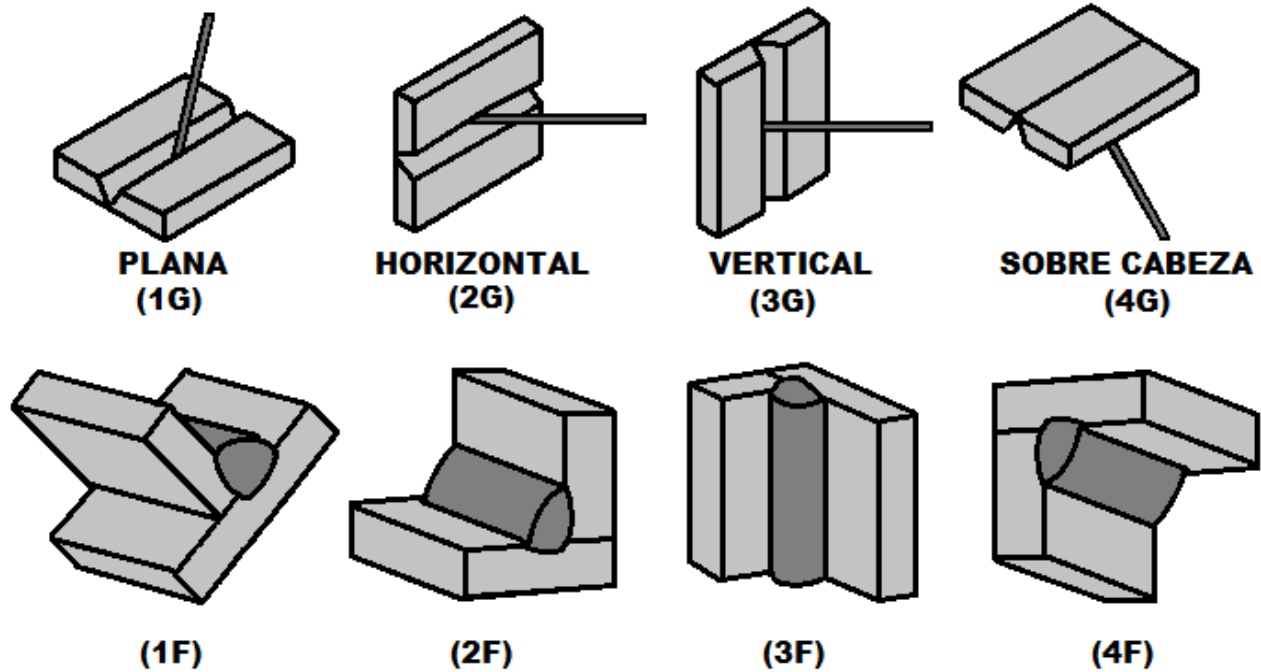


Figura 3.9. Tipos de posiciones de soldadura (2, 3, 18, 30)

3.4. Símbolos de soldadura

En cada cultura, país, región, organización o incluso clases de individuos, conforman su propio léxico y expresiones con las que se comunica y se hace entender; por lo anterior, la soldadura tiene su propio léxico o jerga, el cual consta de una gran cantidad de símbolos de soldadura y terminología, que informan de lo que se debe hacer o lo que no se debe hacer a la hora de realizar una unión solada. Cómo el léxico de la soldadura puede variar de un país a otro, esto es un problema en el actual mundo globalizado y por tal motivo, las organizaciones especializadas en la materia han unificados términos y definiciones para facilitar la comunicación entre personas que trabajan en soldadura, sin importar su país de origen, región o idioma. Una analogía son las señales de tránsito que son de uso internacional y no requieren largas explicaciones, con ellas no existe la barrera del idioma, porque cualquier persona las comprende. En la soldadura se utilizan ciertos signos en los planos de ingeniería, para indicar al soldador ciertas reglas que se deben seguir, aunque no tenga conocimientos de ingeniería. Estos signos gráficos se llaman símbolos de soldadura. Una vez que se entiende el lenguaje de estos símbolos, es muy fácil leerlos (3, 18, 30). Los

símbolos usados son ilustrativos y buscan facilitar una comunicación efectiva entre diseñadores, suministradores y fabricantes de piezas soldadas. Los símbolos de soldadura son tan esenciales en el trabajo del soldador como aplicar un cordón o llenar una unión. La *American Welding Society* (AWS) ha establecido un grupo de símbolos estándar utilizados en la industria para indicar e ilustrar toda la información para soldar en los dibujos y planos de ingeniería. Las normas A.W.S incluyen una serie de símbolos para dar información técnica que no siempre es necesaria, pero que en algunos casos sí lo es, estos símbolos suplementarios se entregan en la figura 3.10. (18, 31, 32).

FILETE	SOLDADURA DE TAPÓN	SOLDADURA POR PUNTOS	SOLDADURA POR ROLDANAS	CORDÓN DE RAÍZ	PENETRACIÓN TOTAL	RECARGUE O RECUBRIMIENTO	BORDES LEVANTADOS	
							DOBLES	SIMPLES

BISEL INCLINADO	ESPARRAGO	BISEL RECTO	BISEL EN V	BISEL EN MEDIA V	BISEL EN U	BISEL EN MEDIA U	BORDES LEVANTADOS	BORDES LEVANTADOS

SÍMBOLOS BÁSICOS

SOLDAR TODO EL CONTORNO	SOLDADURA EN CAMPO	RESPALDO RECTANGULAR	SEPARADOR RECTANGULAR	CONTORNO		
				PLANO	CONVEXO	CONCAVO

SÍMBOLOS COMPLEMENTARIOS

Figura 3.10. Símbolos más empleados (3, 18, 31)

Para reducir la excesiva cantidad de información contenida en los documentos y dibujos se han desarrollado **LOS SÍMBOLOS DE LA SOLDADURA**, que reemplazan palabras escritas y detalles gráficos, para poder presentar la información de una manera clara y abreviada. Los símbolos, esquematizados en los dibujos de Ingeniería, proporcionan la manera de interpretar la información de la soldadura que se aplicará en un determinado proceso. Los símbolos de soldadura se utilizan en la industria para representar detalles de diseño que ocuparían demasiado espacio en el dibujo si

estuvieran escritos con todas sus letras. Por ejemplo, el ingeniero o el diseñador desean hacer llegar la siguiente información al taller de soldadura: (18)

- ◆ Lugar donde se requiere hacer la soldadura.
- ◆ Forma de aplicación de la soldadura (filete en ambos lados).
- ◆ Un lado del filete de 15 mm y el otro de 9 mm.
- ◆ Los dos cordones de soldaduras se harán con un electrodo E 7018.
- ◆ La soldadura de filete de 9 mm se esmerilará con máquina hasta tener la forma o dimensión deseada.

Para dar toda esta información, el ingeniero o diseñador sólo pone el símbolo en el lugar correspondiente en el plano para transmitir la información al taller de soldadura. Los símbolos de soldadura formulados por la *American Welding Society*, son gráficos que se adicionan a los planos de piezas que van a ser soldadas, con los siguientes ocho elementos. Claro que en ocasiones es necesario usar elementos adicionales que sean necesarios, además los elementos del símbolo de soldadura tiene localizaciones establecidas con respecto a las demás como se ve en la figura 3.11.

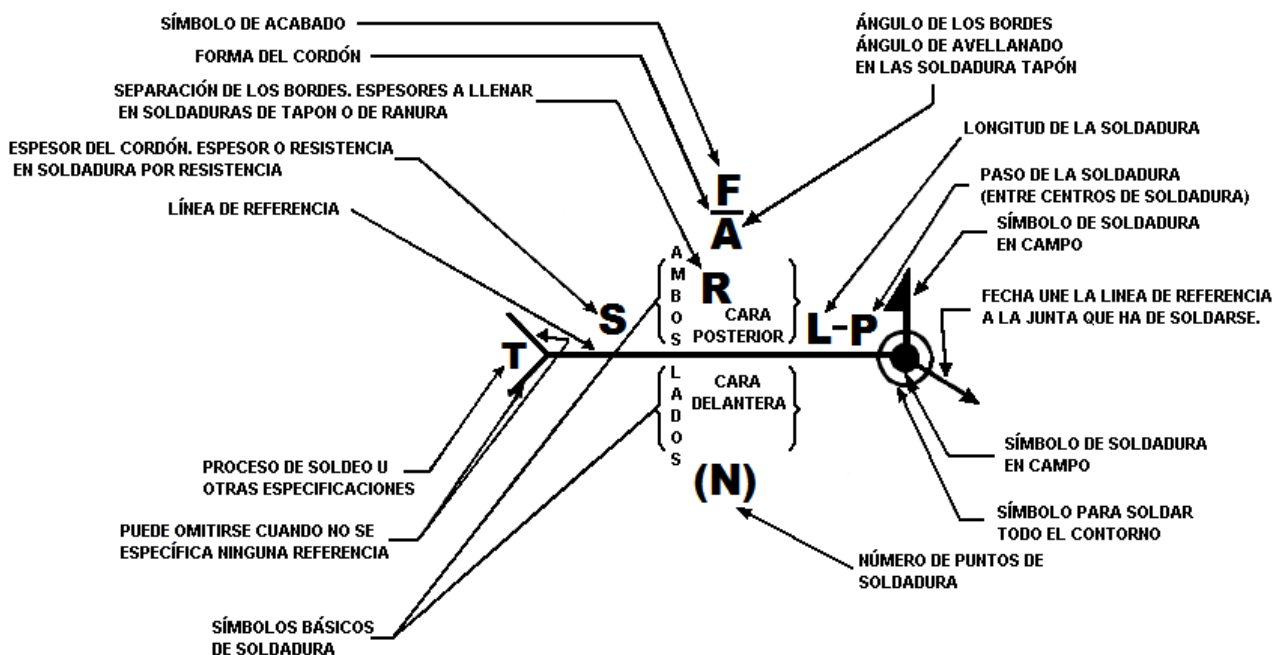


Figura 3.11. Modelo del símbolo de soldadura (3, 18, 27, 31)

Es importante hacer la distinción entre los términos símbolo de soldadura (*Weld Symbol*) y símbolo de aplicación de soldadura (*Welding Symbol*). La primera indica el tipo de soldadura en el cordón, la que al ser utilizada forma parte del símbolo de aplicación de soldadura (18, 30, 31, 32).

Referencia base: El lado fecha corresponde al lado de la junta a la que apunta el símbolo de la fecha. El lado posterior (otro lado) corresponde al otro lado de la junta opuesta de la fecha como se puede observar en la figura 3.12 y 3.13. Un símbolo de soldadura puede consistir de varios elementos como se observa en la figura 3.11, como elementos principales están la línea horizontal de referencia y la flecha. Se pueden incluir elementos adicionales con el objetivo de indicar aspectos importantes y específicos sobre la soldadura. En forma alterna, la información sobre la soldadura puede ser incluida por otros métodos tales como notas en los dibujos o por detalles, especificaciones, estándares, códigos u otros dibujos que eliminen la necesidad de incluir los elementos correspondientes en el símbolo de soldadura (31, 32).

Línea de referencia: Es la base del símbolo en soldadura y siempre será la misma en todos los símbolos, siendo la plataforma donde todos los demás símbolos de soldadura son agregados. Sin embargo, si el símbolo de soldadura está debajo de la línea de referencia, la soldadura se hará en el lado de la unión hacia el cual apuntara la flecha y si el símbolo de la soldadura está en la parte superior de la línea de referencia, la soldadura se hará en el lado opuesto en que apunta la flecha. Las posiciones de la cola y la flecha pueden intercambiarse, pero los elementos del símbolo están siempre en la misma posición en la línea de referencia. En otras palabras, el símbolo de soldadura hace distinción entre los dos lados de la junta usando la flecha y los espacios debajo y encima de la línea de referencia, los lados son conocidos como: "El lado flecha" y "El lado posterior (otro lado)" y la soldadura se ejecuta de acuerdo a las instrucciones dadas en la parte de arriba de la línea de referencia y la orientación de la flecha no interfiere con estas instrucciones (31, 32).

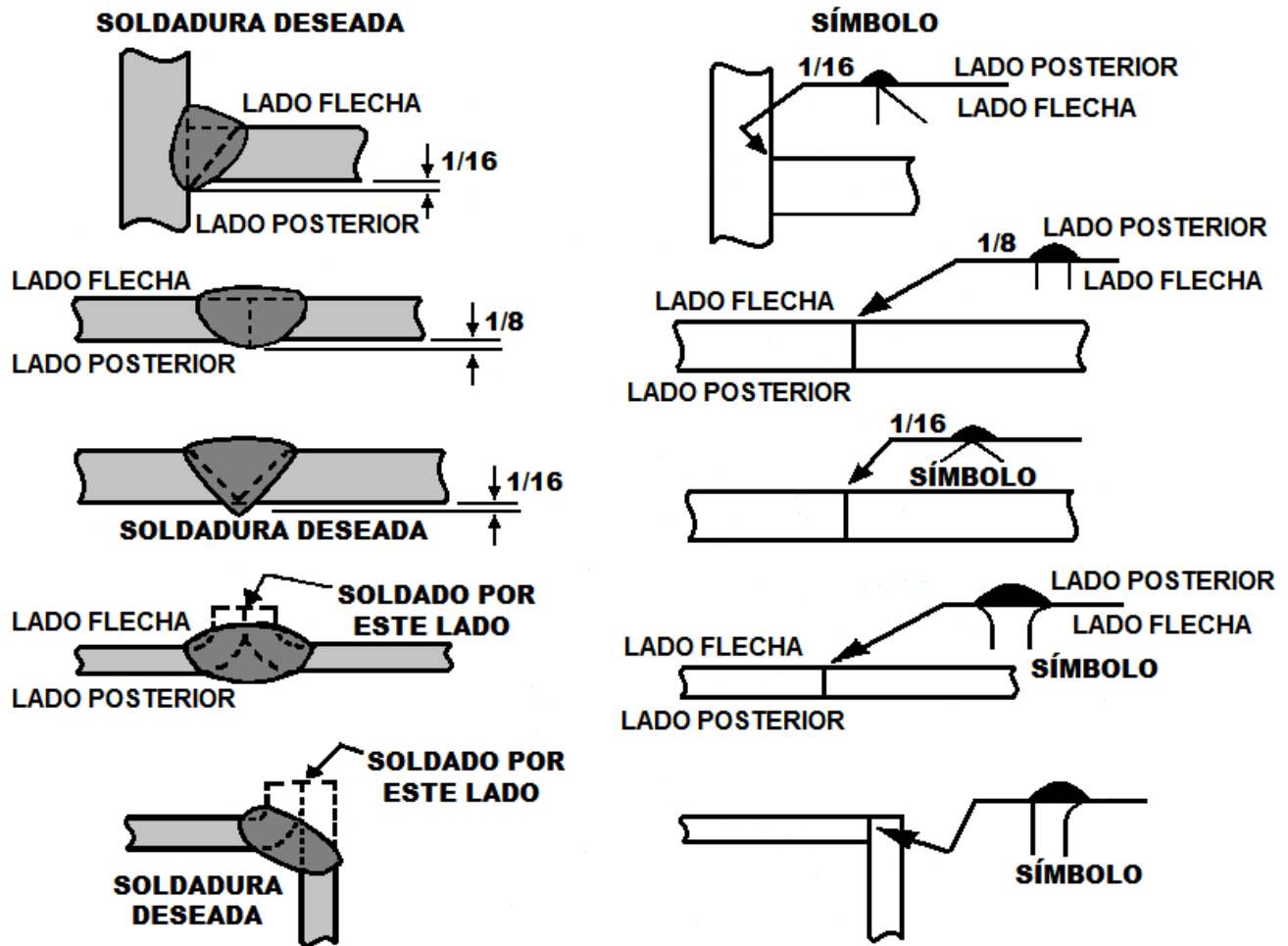


Figura 3.12. Dimensiones y forma de la soldadura según los símbolos (3, 8, 18, 31)

La flecha: La flecha de los símbolos de soldadura debe apuntar hacia una línea, localización o área que en forma concluyente identifique la junta, el lugar o el área que debe ser soldada. La flecha puede tener diferentes direcciones y a veces puede ser quebrada para apuntar a cualquiera de las caras que se desean preparar los bordes y/o soldar; además, la flecha une la línea de referencia con la junta a soldar. Dos o más flechas pueden ser usadas con una simple línea de referencia apuntando a lugares en donde están especificadas soldaduras idénticas (18, 31, 32).

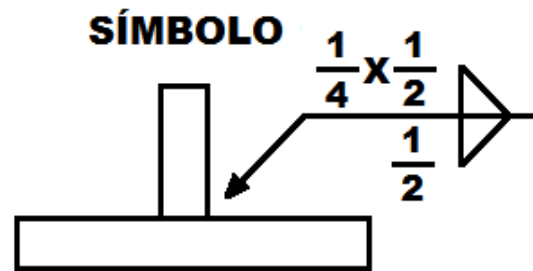
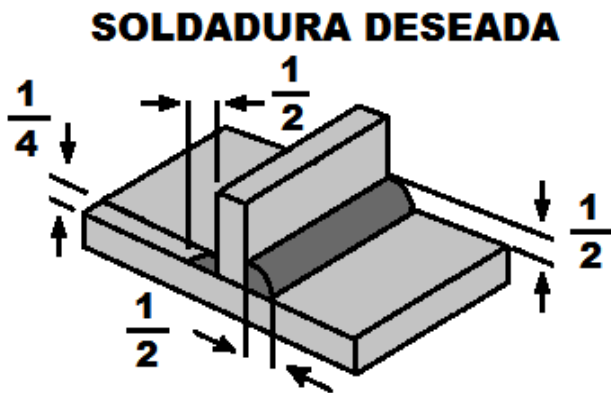
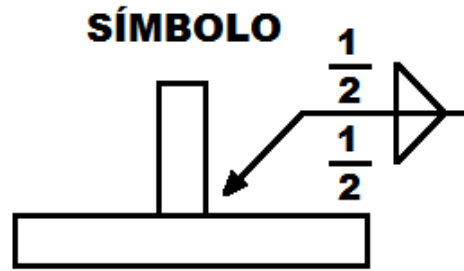
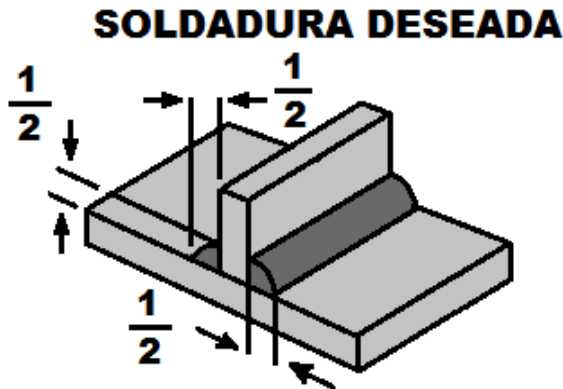
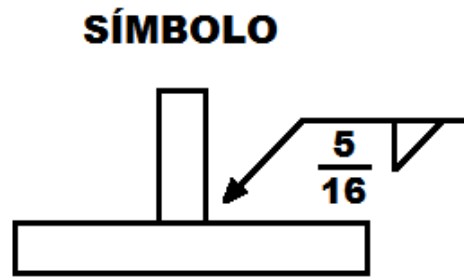
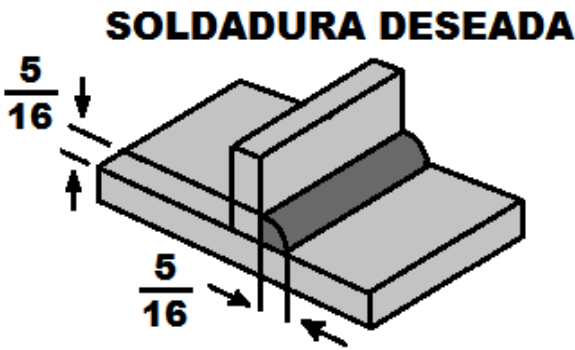


Figura 3.13. Dimensiones en soldadura en filete (3, 18, 27, 31)

La cola: La cola del símbolo de soldadura se utiliza para indicar información adicional tales como especificaciones de la soldadura, procesos, procedimientos, tipo de material de aporte o electrodo, limpieza de la raíz y otras informaciones suplementarias necesarias para la realización de la soldadura, si no hay anotaciones, quizás no contenga información especial y se pueda omitir. Un ejemplo de cómo se aplican los símbolos de soldadura se observa en la figura 3.13. (18, 31).

Símbolos básicos de soldadura: Indican los tipos de soldaduras utilizadas para unir las juntas, donde cada uno corresponde a una soldadura en particular (18, 31).

Símbolos suplementarios: Se utilizan para suministrar información adicional con respecto a la soldadura y cada signo es diferente, tal como se muestra en la figura 3.10 y la figura 3.12. Los símbolos suplementarios deben ser utilizados en conexión con los símbolos de soldadura (18, 31).

Símbolos de contorno o acabado: Los contornos se pueden obtener con la aplicación de soldadura obteniendo superficies lisas o rasantes, planas, convexos o cóncavos sin utilizar el terminado mecánico y se deben especificar adicionando en el símbolo de soldadura el contorno raso o plano, convexo o cóncavo. No deben utilizarse las designaciones sobre el acabado cuando el contorno debe lograrse con la aplicación de soldadura. Cuando el contorno debe lograrse posterior a la aplicación de soldadura, se utilizan las designaciones de acabado, aunque no se debe especificar el grado de terminado. Los símbolos son: C= Cincelado; G= Esmerilado; H= Martillado; M= Maquinado; P= Prensado, R= Fresado y U= No especificado (31).

Dimensiones y otros datos: Se agregan acotaciones adicionales a la derecha del símbolo, si la unión se va a soldar por puntos en caso de la soldadura de filete. Además se colocan datos como la longitud del brazo, longitud de la soldadura, el paso, tamaño y espacio entre las soldaduras intermitentes y otros datos similares en la línea de referencia. En las soldaduras de tapón o de ranura indican la profundidad del relleno y el ángulo de avellanado (18, 31).

El mismo sistema que es usado para los dibujos, debe ser usado en los símbolos de soldadura. El sistema métrico o inglés se puede considerar como estándar para dibujar estos símbolos, pero no se puede usar un sistema dual de unidades en una representación simbólica de soldadura. Cuando se requiera incluir conversiones del sistema métrico al americano o viceversa, se puede incluir sobre el dibujo una tabla de conversión de

unidades. La AWS recomienda utilizar como referencia para la conversión de unidades la norma ASME Y14, estándares para dibujos de ingeniería y practicas relativas a este tema; para guiarse sobre el uso del sistema métrico de unidades utilice como referencia la norma AWS A1.1, guía del sistema métrico para la industria de la soldadura (31); en la figura 3.14 se observan la aplicación de símbolos de soldadura de contorno (18).

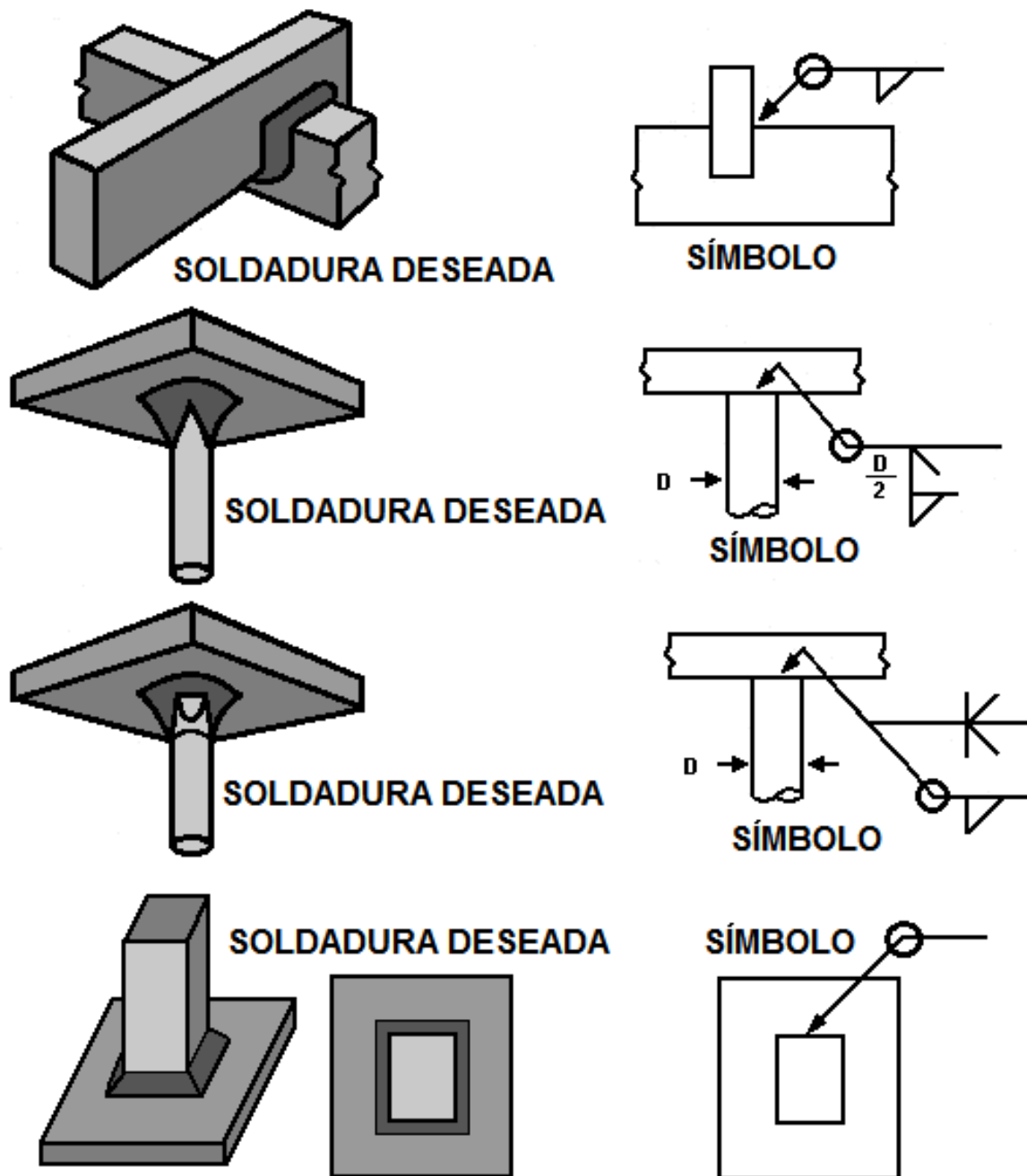


Figura 3.14. Dimensiones y forma de la soldadura en contorno (8, 18, 31)

3.4.1. Aplicaciones de los símbolos de soldadura

Algunos símbolos son muy complicados o parecen serlo a primera vista; pero si se estudian punto por punto, son fáciles de entender. Hay gran número de combinaciones que se pueden utilizar, pero los símbolos básicos de soldadura y los símbolos completamente mostrados en la figura 3.10, los cuales abarcan la mayor parte de las soldaduras. Las soldaduras que se requiere realizar alrededor de la junta se indican con el símbolo circular de soldadura de contorno. Las soldaduras en montaje, es decir las que no se hacen en el taller o en la fase inicial de la construcción, se indican con el símbolo de soldadura de montaje el cual es una bandera localizada en la esquina de la línea de referencia. Cuando se requiere que el cordón tenga una forma determinada, plano, cóncavo, convexo se expresa mediante un símbolo que se le agrega a la línea de referencia, además si requiere de mecanizado se indica mediante una letra que señala el método de acabado. En la figura 3.15, se observa un esquema de acabados de cordones de soldadura (18, 31).

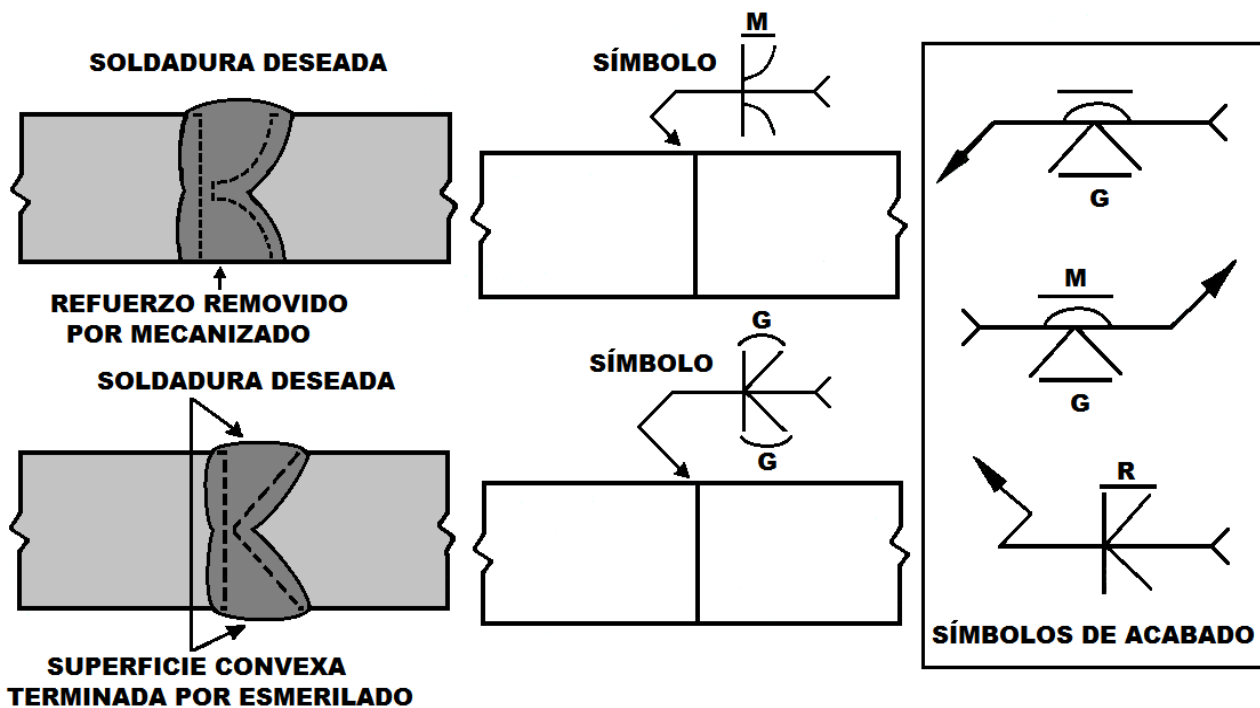


Figura 3.15. Acabado en los cordones de soldadura (8, 18, 31)

El símbolo de penetración completa, indica que se requiere obtener un penetración completa, soldando desde un sólo lado de la junta, esto se indica mediante un símbolo que se pone en el lado opuesto del símbolo de soldadura, el símbolo de penetración no especifica ninguna medida sólo el sobreespesor del cordón de penetración, en la figura 3.12 se observa las juntas con penetración completa. Cuando la soldadura requiere contornos lisos, cóncavo o convexo, se tiene que especificar en el símbolo de soldadura, además, si este terminado se va obtener pos soldadura se le debe adicionar el símbolo de acabado.

3.4.2. Dimensiones de la soldadura de filete

Las dimensiones de las soldaduras de filete deben ser mostradas sobre el mismo lado de la línea de referencia como en el símbolo de soldadura. Las dimensiones de las soldaduras de filete de ambos lados de la junta deben ser especificados independientemente, si las dimensiones son idénticas o diferentes. Las dimensiones de las soldaduras de filete señaladas a través de notas en los dibujos, cubiertas por dibujos de notas, no necesitan ser repetidos sobre los símbolos de soldadura. El tamaño de la soldadura de filete debe ser especificado a la izquierda del símbolo de soldadura. El tamaño de la soldadura de filete con piernas desiguales debe ser especificado a la izquierda del símbolo de soldadura. La orientación de la soldadura no es especificada en el símbolo y debe ser mostrada en el dibujo para tener mayor claridad. La longitud del cordón de filete se indica a la derecha del símbolo de soldadura, cuando la longitud de la soldadura de filete se extiende por toda la junta no es necesario especificarla (31).

Las soldaduras discontinuas quedan definidas por la longitud de los cordones y el paso o distancia entre los medios, medidas entre los centros de dos cordones consecutivos, ambas medidas se indican a la derecha del símbolo, primero la longitud del cordón a continuación el paso. (Ver figura 3.16). En el caso de soldaduras intermitentes (discontinuas) que tengan un número de cordones definido, se deben indicar las dimensiones, en el siguiente orden: 1) Número de cordones de soldadura (n); 2) Longitud de cada cordón de la soldadura (l); y 3) Espacio entre cada cordón de soldadura (e), este valor ha de situarse entre paréntesis. La

representación final de la longitud de la soldadura es la siguiente: $n \times l (e)$, por ejemplo 4 x 20 (30), en la figura 3.16 se observa un ejemplo de soldaduras discontinuas en filete (31, 32).

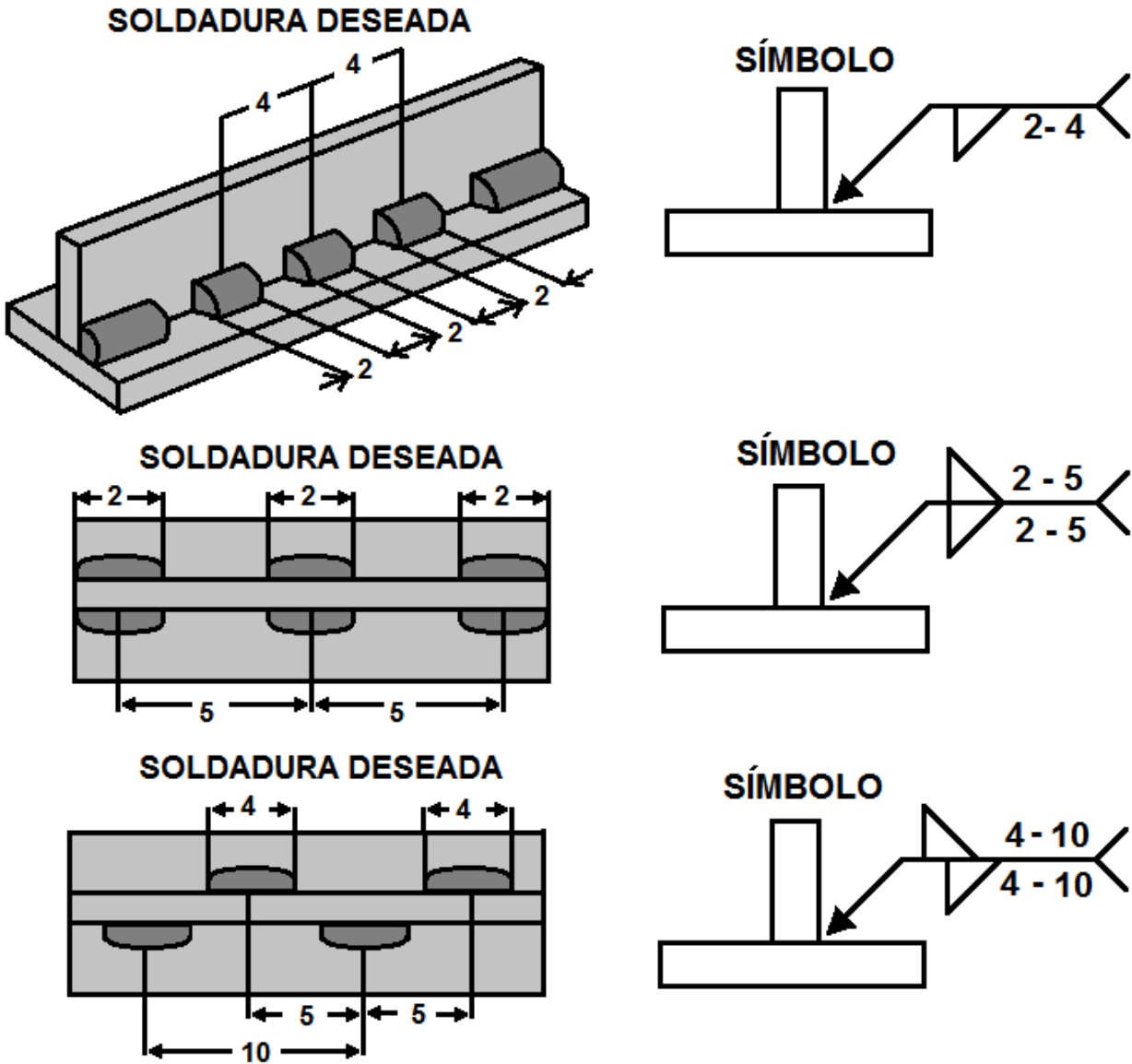


Figura 3.16. Dimensiones en soldadura discontinua (3, 8, 18, 31)

Las medidas de altura y ancho del filete se ubican a la izquierda del símbolo y la medida del extremo izquierdo es la altura. La longitud del filete y la distancia entre centros de intervalos de soldadura se colocan a la derecha del símbolo. La primera medida, de la derecha del símbolo corresponde a la longitud del filete; luego, va un guion que separa la

medida entre centros de intervalos. Una práctica común es la aplicación de soldadura en intervalos intermitentes, en lugar de continua, para disminuir la tensión y la distorsión entre los materiales. Así mismo, para ahorrar material y tiempo en la aplicación de la soldadura. Si a la derecha no hay dimensión, implica que la soldadura es continua a lo largo de toda la unión (18, 31, 32).

En este capítulo se han mostrado los símbolos básicos para soldar y sus aplicaciones, pero se debe recordar que son simples ilustraciones y que probablemente incluirá mucha más información si fuera parte de un plano real. Puntos que debemos recordar en simbología: (18)

- Los símbolos de soldadura en los dibujos y planos de ingeniería representan detalles de diseño.
- Los símbolos de soldadura se utilizan en lugar de repetir instrucciones normales.
- La línea de referencia no cambia.
- La flecha puede apuntar en diferentes direcciones.
- En ocasiones, se puede omitir la cola del símbolo.
- Hay muchos símbolos, dimensiones (acotaciones) y símbolos complementarios.
- Los símbolos no son complicados si se estudian punto por punto.

3.4.3. Soldaduras tapón

En las soldaduras de tapón, el diámetro del agujero se indica a la izquierda del símbolo de soldadura, especificando el espesor del tapón de soldadura, el paso o distancia entre tapones el cual va a la derecha del símbolo y cuando no debe llenar al agujero en el interior del símbolo, además debe indicar el ángulo de avellanado debajo del símbolo. Estas soldaduras tapón se usan para unir placas planas, por medio de ranuras y huecos en la parte superior de la placa, que se rellena con material de aporte (soldadura) para unir las dos láminas o partes. La soldadura puede llenar parcial o totalmente la ranura y se usan cuando los miembros se traslapan y no se tiene la longitud para una soldadura de filete. Las soldaduras

de tapón y en ojal son similares en diseño pero diferentes en forma y no se deben confundir con las soldaduras en ángulo en un agujero.

Estas soldaduras no se consideran adecuadas para transmitir fuerzas de tensión perpendiculares a la superficie de contacto. En estas soldaduras, el diámetro del agujero se indica a la izquierda del símbolo de soldadura, especificando el espesor del tapón de soldadura. En las figuras anteriores se muestran los símbolos muy básicos para soldar y sus aplicaciones. Pero se debe recordar que son simples ilustraciones y que probablemente incluirá mucha más información si fuera parte de un plano real. En la figura 3.17, se observan símbolos y soldaduras de tapón.

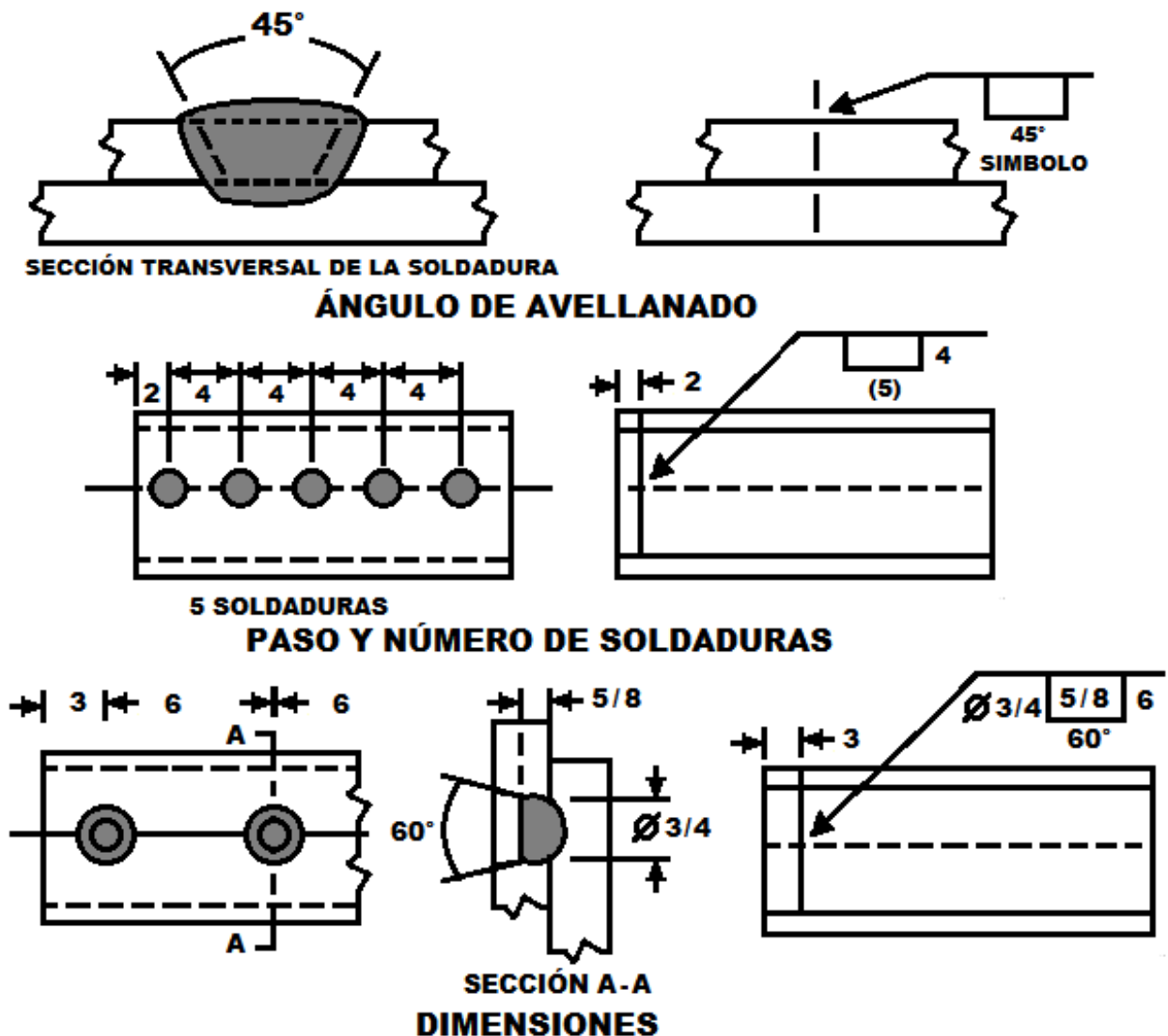


Figura 3.17. Símbolos de soldaduras de tapón (3, 31)

Las deformaciones por la soldadura es una de las consecuencias más difíciles de evitar, lo cierto es que es inevitable. Lo único que podemos hacer es minimizar dichas deformaciones. Además después de que se han producido, corregirlas es todo un arte y no es nada fácil. Por esto mismo, se han de procurar que sean lo más leves posibles. Estas se producen por consecuencia de una dilatación del material debido al calor que adquiere por la fusión producida entre los materiales a soldar y el material de aportación. En el proceso de enfriamiento el volumen de los materiales contrae más de lo que había dilatado, por consiguiente se generan unas tensiones que obligan a los materiales a deformarse por sus partes más débiles. La fuerza que producen estas tensiones es tal que incluso pueden llegar a fisurar o fracturar las uniones de soldadura. Las deformaciones por la soldadura es algo que nunca se puede reducir a cero, pero se pueden reducir para que las piezas soldadas no queden distorsionadas. Vamos a seguir estas pautas recomendables:

- * No soldar más de lo necesario en lo que a longitud de los cordones se refiere.
- * No hacer cordones gruesos innecesarios para no aplicar energía de más.
- * Ajustar la intensidad de la corriente a la baja, el exceso de calor produce deformaciones por la soldadura más exageradas.
- * No dar más cordones en la misma unión de los necesarios; puntear y soldar en sentido contrapuesto para equilibrar las fuerzas de las tensiones producidas por el calor de los puntos y cordones de soldadura.
- * Hacer una previsión de las contracciones y arriostrar (sujetar) los materiales a soldar
- * Reducir y minimizar los tiempos de soldadura para aportar la menor cantidad posible de energía.
- * Planificar las secuencias de los cordones que se van a hacer para contraponer en fuerzas opuestas.

Se utilizan diferentes secuencias a fin de reducir la cantidad de deformaciones causadas por las operaciones de soldadura. Las tres técnicas más comúnmente empleadas son: secuencia en retroceso (paso peregrino); secuencia en bloque; secuencia en cascada (3, 8, 33). En la figura 3.18, se observan tres secuencias de cordones de soldadura.

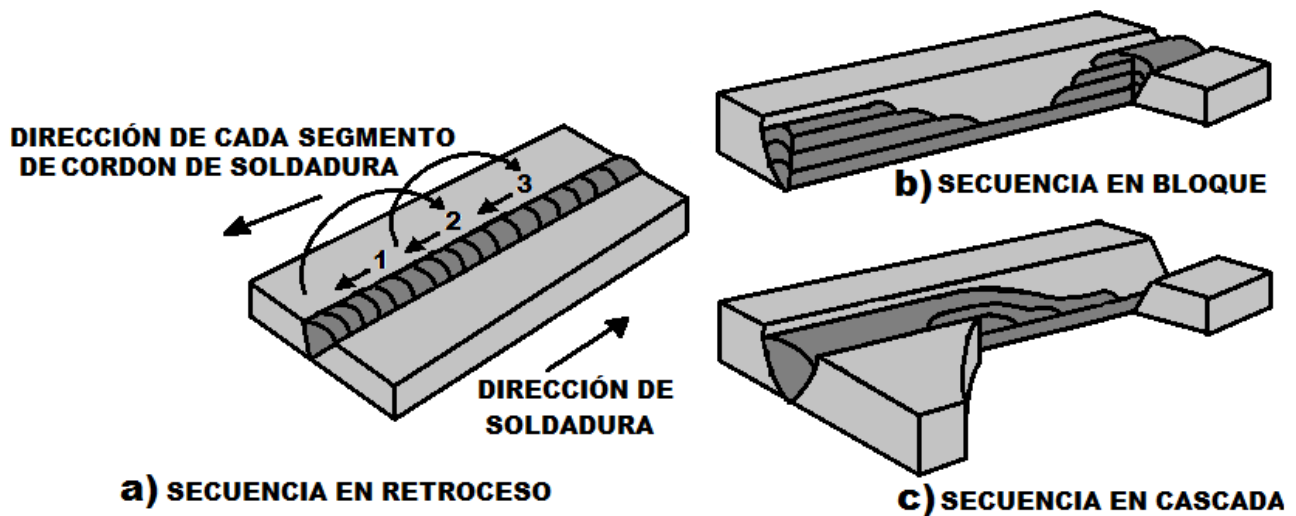
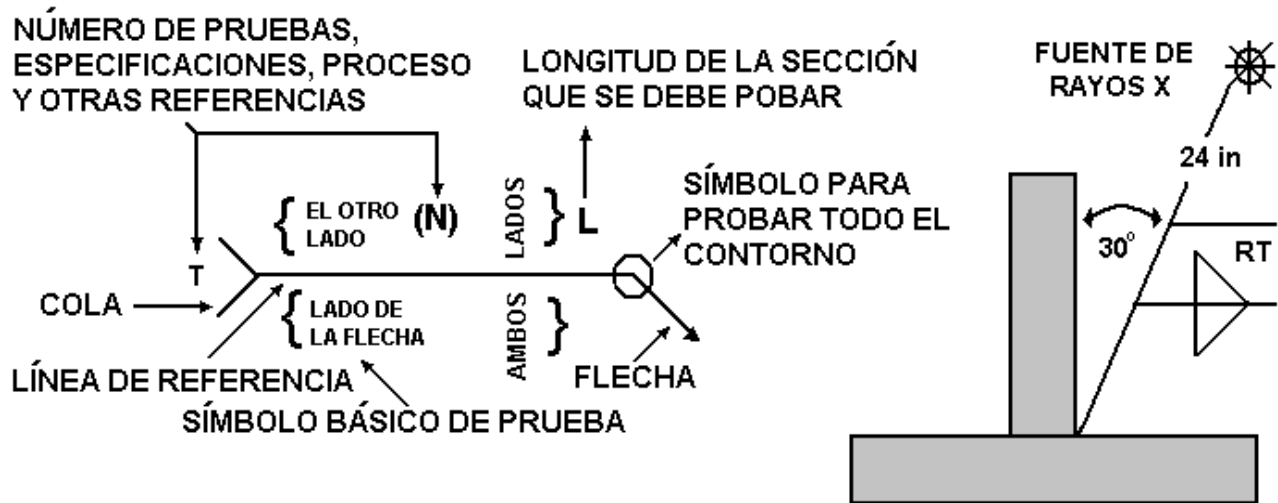


Figura 3.18. Secuencia de los cordones de soldadura (3)

3.4.4. Símbolos de pruebas no destructivas

Los símbolos de pruebas no destructivas consisten de los siguientes elementos: línea de referencia, flecha, letras de designación para las pruebas no destructivas, extensión y número de pruebas no destructivas, símbolos suplementarios y cola donde se puede ubicar especificaciones, códigos y otras referencias. Las pruebas que se van a realizar están enmarcadas sobre el lado correspondiente de la línea de referencia, sin embargo, cuando la prueba no destructiva no tiene importancia si es ubicada en el lado flecha o en el lado posterior (otro lado), el símbolo de prueba se coloca centrado sobre la línea de referencia. Una soldadura puede tener más de un método no destructivo y se colocan las letras designadas para los ensayos y deberán estar separadas por el símbolo de suma (+). Cuando se requiera especificar dimensiones en los símbolos de ensayos no destructivos, se deberá utilizar el mismo sistema de unidades usado en los planos o dibujos, ya que aquí tampoco se permite dualidad de unidades. En la figura 3.19 se observa el símbolo básico de soldadura y como se ubica la fuente de rayos X en un ensayo por medio de radiografía (18, 31). Las siguientes abreviaciones son utilizadas para especificar las pruebas no destructivas realizadas en juntas soldadas de acuerdo con la tabla A.6 de la norma AWS 2.4.

- * VT Inspección visual
- * UT Ultrasonido
- * RT Radiografía
- * MT Partículas magnéticas
- * PT Penetrante
- * AET Emisión acústica
- * ET Corrientes de Eddy
- * LT Fuga
- * NRT Neutron radiográfico
- * PRT Prueba



a) Modelo símbolo de prueba no destructiva b) Símbolo de prueba no destructiva

Figura 3.19. Símbolo completo de pruebas no destructivas y símbolo que muestra la posición de la fuente de rayos X (8, 18, 31)

Los símbolos de pruebas no destructivas y los símbolos de soldadura se pueden combinar, las pruebas que se hacen a todo lo largo de la junta son especificadas por el símbolo de soldadura en todo el contorno. Cuando se desea toda la longitud, no se colocan dimensiones en el símbolo de prueba, pero si se desea probar sólo una parte de la junta, se indica la longitud y el porcentaje de la longitud a probar a la derecha del símbolo de prueba. El número de pruebas que se van a realizar en una junta o en una parte en localizaciones aleatorias, se indican por la cifra entre paréntesis encima o debajo del símbolo. En ocasiones es necesario indicar la posición y la dirección de la fuente de rayos X en relación con la soldadura que se va a inspeccionar (18).

4. PROCESOS DE SOLDADURA

La soldadura es un proceso metalúrgico para la unión de partes o recargue de superficies, principalmente por la cohesión localizada, ya sea por fusión y/o presión, en la cual, generalmente se necesita material de aporte; y para poder conocer sus fundamentos primero se debe entender la forma como los metales se comportan durante su producción. En los procesos de soldadura, al igual que la fundición de los metales, se requiere de altas temperaturas para hacer posible la fusión. El tipo de fuente de calor es básicamente lo que describe el tipo de proceso. Uno de los principales problemas en soldadura, es el comportamiento de los metales ante la combinación de los agentes atmosféricos y los cambios de temperatura. El método de proteger el metal caliente, del ataque de la atmósfera, es uno de los mayores problemas a resolver. Las técnicas desarrolladas van desde la protección por fundente, hasta la protección por gas inerte, los cuales son mucho más que escudos protectores, para lo que inicialmente fueron creados. En algunos casos la atmósfera es removida usando sistemas de vacío. La unión por soldadura ha resultado ser un proceso muy importante en el desarrollo de las estructuras, ya que es fácil de emplear y tiene gran efectividad, aunque tiene algunas variables que deben ser controladas detalladamente, para obtener un óptimo resultado.

Hoy en día, la ciencia de soldadura ha avanzado mucho, permitiendo la utilización de tecnologías vanguardistas como robots, así como desarrollo de procesos mecánicos y automáticos de gran velocidad. Algunos de estos procesos han sido desarrollados para algunas aplicaciones específicas, mientras otros se mantienen muy flexibles, cubriendo un amplio intervalo de actividades en la soldadura. Aunque la soldadura es usada principalmente para unir metales similares, es también muy usada para reparar y reconstruir partes averiadas o desgastadas. Hay un crecimiento notable en el uso de diferentes aplicaciones, para tratar las superficies con una capa de soldadura de alta dureza en partes nuevas y usadas, que provea una superficie altamente resistente a la corrosión, abrasión, impactos y desgaste, conllevando al aumento de la vida útil de las piezas. Los desarrollos

tecnológicos actuales se centran en la aplicación de la microelectrónica y de la informática, para un mejor control del arco y de los parámetros de soldeo; y no en el desarrollo de nuevos procesos de soldadura. Además se está ampliando el campo de aplicación para nuevos materiales no metálicos y en aleaciones metálicas hasta ahora difícilmente soldables, sin olvidar la calidad de las uniones soldadas por medio de ensayos no destructivos y el registro de los parámetros en tiempo real.

Durante la soldadura se busca la unión del material a nivel atómico y obtener la máxima continuidad metalúrgica y mecánica, por eso cuando se quiere seleccionar un proceso de soldadura, se deben conocer las posibilidades que se tienen y sus limitaciones. La selección del proceso de soldadura está determinada por varios factores, en donde hay que tener muy en cuenta la integridad metalúrgica, mecánica, su comportamiento en servicio, el costo y la calidad. Los factores que afectan la selección del proceso de soldadura son: (18, 27)

- Tipo de material, dimensiones, espesor, figura y la forma de las piezas a unir.
- Posibilidad de acceso al lado posterior de la soldadura.
- Posición en la cual se va a realizar la soldadura y que requerimiento tiene el pase de raíz.
- Equipos de soldadura, tipo de corriente, ciclo de trabajo y accesorios disponibles.
- Forma y preparación de la junta.
- Soldabilidad de los metales.
- Tipo de soldadura disponible y elementos de consumo
- Estándares y especificaciones.
- Requerimientos de precalentamiento y pos calentamiento.
- Calificación de los soldadores.
- Requerimientos de calidad en la soldadura.
- Normas de seguridad.
- Inspección de la soldadura
- Factor económico

Tipo de material: La soldabilidad del material juega un papel importante en la selección del proceso de soldadura, ya que de este depende el tipo de protección, características del electrodo, si necesita pre y pos calentamiento, entrada de calor, tipo de corriente, longitud de los cordones y la velocidad de avance. Las dimensiones, la forma y la figura de las piezas limitan el uso de algunos procesos, favoreciendo otros (18, 27).

Posición: Las posiciones de soldadura tiene diferentes grados de dificultad y por tal motivo, se debe tratar de hacer todas las soldaduras en posición plana que es la más fácil de realizar; las otras posiciones ponen limitaciones en la aplicación de los procesos de soldadura, debido a la acción de la fuerza de la gravedad (18, 27).

Requerimientos de la junta: Los esfuerzos que soportará la junta está en función de la calidad de la soldadura y la estructura metalúrgica del cordón de soldadura y su zona afectada térmicamente. El pase de raíz siempre debe penetrar totalmente y fundir los bordes de la junta, a menos que el diseñador especifique penetración parcial. Los requerimientos de la junta deben estar acordes con el proceso de soldadura (18, 27).

Preparación de la junta: La limpieza de las superficies a unir es muy importante en la preparación de las juntas. El material y su espesor influyen en la preparación de la junta o en la selección del proceso, por ejemplo, el ángulo de los chaflanes en V en placas gruesas, es mayor para el proceso de soldadura por arco con gas de protección (GMAW), que para el proceso de soldadura por electrodo revestido. Una preparación incorrecta de la junta puede causar imperfecciones, que deben ser detectadas a tiempo por medio de técnicas no destructivas como el ultra sonido o por radiografía (18, 27).

Equipos de soldadura: La disponibilidad de fuentes de potencia, equipos de soldadura y accesorios, tiene gran influencia en la selección del proceso de soldadura en campo. Un factor importante en la selección del equipo, es el ciclo de trabajo, ya que este indica la producción de soldaduras sin afectar el funcionamiento del equipo. El ciclo de trabajo está basado en 10 minutos y con un amperaje predeterminado, entonces, si un equipo tiene un

rendimiento del 80 %, a 250 A, quiere decir que puede trabajar 8 min a este amperaje y debe descansar 2 min, las soldaduras con procesos manuales, tienen ciclos de trabajo bajos, con amperajes medios o bajos y las soldaduras con procesos automáticos, requieren ciclos de trabajo altos con amperajes medios o altos (18, 27).

Materiales de consumo: Los procesos de soldadura requieren materiales de consumo como electrodos recubiertos, alambres, gas de protección, gases de combustión, electrodos de tungsteno, entre otros. Un factor a considerar en la selección del metal de aporte, es la eficiencia de deposición del material de aporte, según el procedimiento de soldadura; por ejemplo, para el proceso SMAW es del 70 % y para el proceso MIG es del 90 %, siendo la eficiencia de deposición, la relación del peso del material depositado contra el peso del electrodo o el alambre consumido para hacer la soldadura (18, 27).

Calificación del soldador: La soldadura debe aplicarse de acuerdo con ciertos códigos, los cuales exigen la calificación del soldador y de los procesos de soldadura, además de un buen equipo de soldadura y personal calificado. De nada sirve usar materiales y soldadura de buena calidad, si en la aplicación se cometen errores que van a deteriorar la resistencia y la calidad del metal base y del cordón de soldadura. La certificación del soldador puede ser un proceso rutinario que no es crítico a la hora de seleccionar el proceso (18, 27).

Calidad en la soldadura: El nivel de calidad requerido para una soldadura es considerado en la selección del proceso, ya que los procesos de soldadura manuales, dependen en gran parte de la habilidad del soldador y no producen soldaduras de alta calidad, como los procesos automáticos (18, 27).

Economía: Los costos de producción es uno de los factores más importantes en la selección del proceso, sin embargo, la adaptabilidad del proceso a los requerimientos, puede causar grandes costos, ya que cuando se requiere soldaduras en diferentes partes y en diferentes posiciones, es muy difícil de automatizarlas y sería muy costoso hacer la soldadura bajo un proceso automático (18, 27). Pero si las soldaduras son largas y en la

misma posición, el proceso automático sería ventajoso frente al proceso manual. Para aumentar la productividad en los procesos de soldadura hay que disminuir el tiempo del arco por junta soldada, reducir los desperdicios en los consumibles de soldadura y material de aporte, entre otros, disminuir los tiempos muertos y evitar los reprocesos y rechazos. El uso de procesos de soldadura que tengan mayores valores de tasa de deposición, eficiencia de deposición y factor de operación tendrán una mayor productividad (15-17). A continuación se hace un resumen de los principales procesos de soldadura.

4.1. Soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW)

La soldadura eléctrica es indispensable para un gran número de industrias, siendo un proceso económico, fácil de utilizar y que presenta buenos resultados, además se puede aplicar a casi toda clase de metales. El término soldadura por arco es aplicado a varios procesos de soldadura, en los que se utiliza un arco eléctrico, para fundir los bordes de metales y aleaciones para unirlos formando una pieza única que es resistente y con propiedades casi homogéneas.

El arco eléctrico fue descubierto por Sir Humphrey Davy en 1801, pero no fue desarrollado para la aplicación de soldadura por arco eléctrico hasta finales del siglo XIX, en donde se hizo posible el soldeo por fusión. A principios del XX se desarrolló la soldadura por arco eléctrico con electrodo recubierto; en sus inicios, la soldadura por arco se utilizó principalmente en la reparación de piezas desgastadas o dañadas. No fue hasta la primera guerra mundial que empezó a ser aceptada como técnica de unión en la construcción, manteniéndose como la técnica de soldadura más antigua, flexible y versátil de todos los procesos de soldadura por arco. El proceso por arco con electrodo revestido se mantiene como uno de los más usados entre todas las técnicas de soldadura. Como el mismo nombre lo dice, es un arco eléctrico que se establece y mantiene entre la punta del electrodo cubierto y el metal base de la pieza a soldar. Las gotas de metal fundido son transferidas a través del arco al cordón de soldadura y un escudo protector de gases es producido por la descomposición de los fundentes que cubre el electrodo, que a su vez forma la escoria que

protege el metal fundido del cordón de soldadura, aislándolo de la atmósfera durante la solidificación. La escoria debe ser removida después de cada aplicación del cordón de soldadura para evitar la inclusión de escoria en el siguiente cordón; en la figura 4.1 se observa un esquema del proceso SMAW (27, 34).

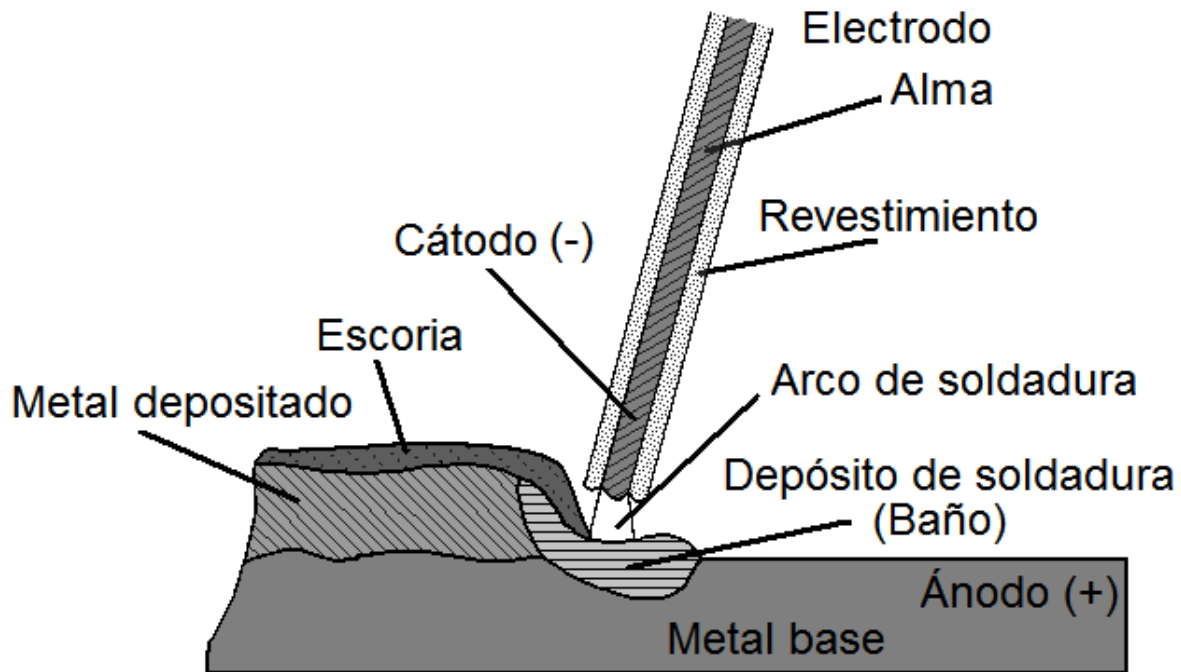


Figura 4.1. Esquema del proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo recubierto (8, 18, 27)

El proceso de soldadura se inicia con el cebado del arco, el cual consiste en tocar la pieza con el extremo del electrodo libre de recubrimiento, cerrándose el circuito durante un corto tiempo. El paso de corriente genera el calentamiento del punto de contacto y de las zonas inmediatas por efecto Joule, particularmente el extremo del electrodo. En el momento de separar el extremo del electrodo de la pieza, el metal del electrodo produce una fuerte emisión de electrones que se aceleran por la presión y chocan con los electrones de otros átomos del medio gaseoso, generando una atmosfera ionizada, que permite el paso de corriente a través del aire. Los electrones que van del electrodo al ánodo provocan la fusión parcial del electrodo y producen así el salto del arco (3,18, 27, 35). La energía eléctrica es convertida en calor, generando una temperatura en el arco alrededor de 5000 °C, causando la fusión y la unión de los metales. La corriente que se emplea en este sistema puede ser

continua o alterna, utilizándose en los mejores trabajos la corriente continua, debido a que la energía es más constante, con lo que se puede generar un arco más estable y con la polaridad exacta del proceso. La corriente alterna permite efectuar operaciones de soldadura a bajo costo, en posición horizontal y preferentemente en materiales no ferrosos, además se prefiere este tipo de corriente cuando se suelda aluminio y aceros inoxidable (18, 23). A pesar de lo relativamente lento del proceso, por el recambio de electrodos y la remoción de escoria, se mantiene como una de las técnicas más flexibles, simples y son notables sus ventajas en áreas de acceso restringido, además el equipo necesario para realizar las soldaduras es más sencillo, transportable y barato que los demás equipos de soldadura; por lo anterior, los otros procesos de soldadura por arco eléctrico no han podido desplazar del mercado a la soldadura con electrodo revestido.

Con este proceso se pueden soldar metales de casi cualquier espesor y con diferentes configuraciones en cualquier posición, tanto en recintos cerrados como abiertos, incluso en lugares con restricciones de espacio, donde no se permite la utilización de otros equipos. Hay electrodos que se pueden usar en los aceros al carbono y de baja aleación, aceros inoxidable, aceros de alta aleación y aún en aceros templados, hierro colado y maleable. A pesar de que se utilizan muy poco, también hay electrodos para soldar cobre, cobalto, bronce, aluminio, níquel y entre otras aleaciones. Sin embargo, el procedimiento de soldadura con electrodo revestido, no se presta para su utilización con equipos automáticos o semiautomáticos, ya que su aplicación es esencialmente manual. La longitud de los electrodos es relativamente corta, por lo que bastan unos cuantos minutos para consumir un electrodo. Debido a que el electrodo se agota en muy poco tiempo, el soldador tiene que interrumpir el trabajo a intervalos regulares para cambiarlo, y además debe picar y limpiar el punto de inicio antes de empezar a usar un electrodo nuevo. Normalmente, el arco funciona menos de la mitad del tiempo total. Sin embargo, aún con todo este tiempo muerto y de preparación, un soldador eficiente puede ser muy productivo (18).

Al soldar, los gases provenientes del metal caliente y del revestimiento, ejercen un efecto de chorro sobre el núcleo de metal fundido, estos gases empujan el metal fundido, en el

electrodo, hacia fuera en dirección de la pieza de trabajo. El chorro no es completamente uniforme, por lo que es posible que los gases se formen más rápidamente de un lado que del otro. Por lo tanto, los efectos del chorro actúan sobre el metal en diferentes direcciones. Es este carácter aleatorio de la transferencia, lo que hace que el cordón sea ancho y que se produzcan salpicaduras. Sin embargo, si se mantiene el electrodo cerca de la pieza y se desliza sobre ella, el chorro de la punta sirve para dirigir las fuerzas del arco y éste llegará a penetrar mejor con una transferencia de metal más uniforme. Puesto que el revestimiento del electrodo aísla eléctricamente la varilla metálica del núcleo, no hay peligro de hacer un cortocircuito contra otras partes metálicas cercanas y apagar el arco. Además, el soldador puede trabajar lejos de la fuente de potencia sin la necesidad de utilizar gases comprimidos como protección. El procedimiento es excelente para diferentes trabajos de reparación, fabricación y construcción, en donde gran parte del trabajo de soldadura con electrodo revestido se realiza en forma rutinaria (18, 35). En numerosas aplicaciones, factores como el aumento de la productividad y la mayor uniformidad de las uniones soldadas, realizados por procesos mecanizados o automáticas, han hecho que estos procedimientos vayan desplazando a la soldadura manual.

Con algunos electrodos se obtienen mejores resultados cuando se mantienen alejados del objeto a soldar, que cuando se aplica la técnica de arrastre. Se debe asegurar que la distancia entre la punta del electrodo y el objeto sea siempre la misma. La soldadura presenta un mejor aspecto cuando se avanza a una velocidad constante y se mantiene un arco de longitud uniforme, ya que cada vez que se hace una pausa en algún sitio, el cordón se hace más ancho. Por otro lado, cuando el metal depositado se solidifica, se notan con claridad los lugares en que varió la velocidad de avance o la longitud de arco. Por lo anterior, si se usa una velocidad de avance constante y una longitud de arco uniforme, se obtiene como resultado un cordón bien formado. La energía del arco y la transferencia de metal varían con la dirección del flujo de la corriente. Cuando se utilice corriente continua, hay que asegurarse de que la polaridad sea la correcta. Es necesario utilizar el tipo de corriente correcto, es decir, no hay que usar corriente continua en lugar de corriente alterna, o viceversa. Los electrodos están diseñados para trabajar con una determinada cantidad de

corriente y polaridad. Si se emplea la corriente equivocada, el arco puede resultar inestable e imposible de manejar. El aumento de las salpicaduras puede aparecer debido a que la polaridad no es la correcta. Otros factores que influyen en la aparición de salpicaduras son las variaciones en la forma que se espera que tenga el arco, una penetración insuficiente, demasiada turbulencia del chorro y una cantidad considerable de salpicaduras o incluso puede llegar a ser imposible encender el arco. Cuando se observe que algo raro sucede con el arco o con la transferencia de metal, hay que revisar las conexiones de la fuente de potencia (18, 27, 35). En la figura 4.2 se observa un esquema de la transferencia de metal en el proceso SMAW.



Figura 4.2. Transferencia del metal en el proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo recubierto (8, 18)

Los principales parámetros de la soldadura por arco eléctrico con electrodo recubierto son el diámetro de electrodo, el tipo de corriente, la intensidad de soldeo, la longitud de arco y velocidad de desplazamiento.

Diámetro del electrodo: Se deberá seleccionar el electrodo de mayor diámetro que asegure las propiedades mecánicas deseadas y que permita su utilización en función de la posición, el espesor del material y el tipo de unión, que son los parámetros de los que depende la selección del diámetro del electrodo. Los electrodos de mayor diámetro se prefieren para soldar materiales de gran espesor, recargues y para la posición plana debido a sus altas tasas

de deposición. Cuando se aplique múltiples pasadas, es conveniente que en el cordón de raíz se realice con un electrodo de diámetro pequeño, para conseguir un mayor acercamiento del arco al talón de la raíz, para asegurar una buena penetración; después del pase de raíz se pueden utilizar electrodos de mayor diámetro para completar la unión soldada. La utilización de diámetros de electrodos grandes puede generar un refuerzo excesivo en el cordón de soldadura, aumentando los costos y actuando como concentrador de tensiones. El aporte térmico depende directamente de la intensidad, tensión del arco y velocidad de desplazamiento, todos ellos parámetros que dependen del diámetro del electrodo. El aporte térmico será mayor cuanto mayor sea el diámetro del electrodo. En las aplicaciones con materiales donde se requiera que el aporte térmico sea bajo se deberán utilizar electrodos de pequeño diámetro. En el soldeo en posición cornisa, vertical y bajo techo el baño de fusión tiende a caer por efecto de la gravedad, este efecto es mayor y más difícil de mantener el baño en su sitio, cuanto mayor es el volumen del metal, es decir, cuanto mayor es el diámetro del electrodo, por lo que en estas posiciones convendrá utilizar electrodos de menor diámetro (27, 35).

Intensidad de soldeo: Los electrodos, de acuerdo a su diámetro, poseen un rango de intensidades de corriente donde pueden utilizarse y que no deben superarse, ya que producirían mordeduras, proyecciones y aumentarán los efectos del soplo magnético e incluso pueden aparecer grietas. Cuanto mayor sea la intensidad de corriente utilizada mayores serán la penetración y la tasa de deposición. La intensidad de corriente utilizada depende de la posición de soldeo y del tipo de unión. Como regla general, se deberá ajustar la intensidad de corriente a un nivel en que la cavidad del baño de fusión sea visible. Si esta cavidad es muy grande y tiene forma elíptica, significa que la intensidad es excesiva.

Longitud de arco: La longitud del arco depende del tipo de electrodo, su diámetro, la posición de soldeo y de intensidad. En general, la longitud del arco debe ser igual al diámetro del electrodo, excepto cuando se emplee electrodos de tipo básico, que deberá ser igual a la mitad de su diámetro. Es conveniente mantener siempre la misma longitud de arco, con objeto de evitar oscilaciones en la tensión e intensidad de la corriente y con ello

tener cordón desigual. En el soldeo en posición plana, sobre todo cuando se utilizan electrodos de revestimiento grueso, se puede arrastrar ligeramente el extremo del electrodo, con lo que la longitud del arco vendrá automáticamente determinada por el espesor del revestimiento. Cuando se produzca sople magnético, la longitud del arco se deberá acortar todo lo posible.

Cuando el arco es demasiado corto, socava la pieza de trabajo y puede ser errático y produciendo cortocircuitos durante la transferencia del metal, haciendo que la transferencia de metal sea dispareja y que las ondulaciones del cordón sean grandes, aumentando la tendencia a que se formen agujeros de escoria y porosidad; mientras que un arco demasiado largo perderá direccionalidad e intensidad disminuyendo la penetración, además el gas y el fundente generados por el revestimiento no son tan eficaces para la protección del arco y del metal de soldadura, por lo que se puede producir porosidad y contaminación del metal de soldadura con oxígeno e hidrógeno. Puede ser que el arco se aparte de su trayectoria normal y que los bordes del cordón resulten irregulares y disparejos. El ángulo que forma el electrodo con la pieza también afecta la transferencia de metal, pues este ángulo dirige la fuerza del arco. Al acercar el ángulo hacia la vertical, aumenta la penetración. A medida que se disminuye el ángulo, se reduce la penetración. Cuando se inclina el electrodo hacia la izquierda o hacia la derecha, que es lo que se conoce como ángulo de trabajo, el cordón se desplaza del centro. Hay que manejar el electrodo como si de su punta emergiera un chorro imaginario de aire. El aire puede empujar el metal fundido, en cualquier punto que se dirija el electrodo.

Velocidad de desplazamiento: La velocidad de desplazamiento se debe ajustar para que el arco este ligeramente delante del charco de fusión. Cuanto mayor es la velocidad de desplazamiento menor es la anchura del cordón, menor es el aporte térmico y más rápidamente se enfriará la soldadura. Si la velocidad es excesiva se producen mordeduras, se dificulta la retirada de la escoria y se favorece el atrapamiento de gases produciendo poros. Según se va aumentando la velocidad de soldeo, el cordón se va haciendo más estrecho y se va aumentando la penetración hasta un cierto punto a partir del cual un

aumento de la velocidad trae como consecuencia una disminución de la penetración, debido a que el calor aportado no es suficiente para conseguir una mayor penetración. Con una baja velocidad el cordón será ancho, convexo y con poca penetración, debido a que el arco reside demasiado tiempo sobre el metal depositado en vez de concentrarse sobre el metal base.

Tipo de corriente: En el proceso SMAW, los electrodos se pueden utilizar con corriente continua o con corriente alterna; la elección dependerá del tipo de fuente de energía disponible, del electrodo a utilizar y del metal base. La transferencia de metal y la fuerza del arco se controlan con la longitud de arco y con la corriente circulante. Cuando hay poca corriente, el arco pierde fuerza y disminuye la penetración. El cordón se adelgaza y el metal se empieza a acumular. También puede suceder que el electrodo se pegue a la pieza de trabajo. Cuando hay demasiada corriente, el arco tiene mucha fuerza; penetra demasiado en el objeto y produce demasiada salpicadura. Un exceso de corriente produce adelgazamiento a lo largo de la orilla de la soldadura y puede llegar a perforar el objeto. En la soldadura SMAW con corriente continua, los cables del porta-electrodo y la pinza de masa se pueden conectar de dos formas. Cuando se conecta el cable de la pinza de masa al terminal positivo del equipo y el cable del porta-electrodo al terminal negativo, se tiene una conexión de polaridad directa, si se conecta el cable de la pinza de masa, al terminal negativo del equipo y el cable del porta-electrodo al terminal positivo, se tiene una conexión de polaridad invertida. En cuanto a la polaridad en corriente continua depende del material a soldar y del electrodo empleado, sin embargo se obtienen mayor penetración y un cordón más estrecho con polaridad directa que con polaridad inversa. La polaridad directa aporta más calor al material base (pieza a soldar), mientras que la polaridad inversa, aporta más calor al electrodo (34, 35). En la figura 4.3, se observa un esquema de la polaridad en el proceso de soldadura SMAW.

Hay que tener cuidado al seleccionar los electrodos, pues resulta importante que su composición sea adecuada al metal que se desea soldar. Si el electrodo y el metal depositado no son compatibles, es muy probable que la soldadura obtenida no sea buena.

No es posible esperar que una soldadura soporte la carga para la que se diseñó, sino se realiza con el electrodo correcto. Un electrodo inadecuado da origen a porosidad, poca resistencia a la corrosión, soldaduras débiles y otros defectos. Se han desarrollado ciertos revestimientos con el propósito de incrementar la cantidad de metal de aporte que se deposita por unidad de tiempo. Otros revestimientos contienen aditivos que aumentan la resistencia y mejoran la calidad de la soldadura. A pesar de que la mayoría de los revestimientos facilitan mucho el trabajo con los electrodos, otros requieren mayor habilidad del soldador.

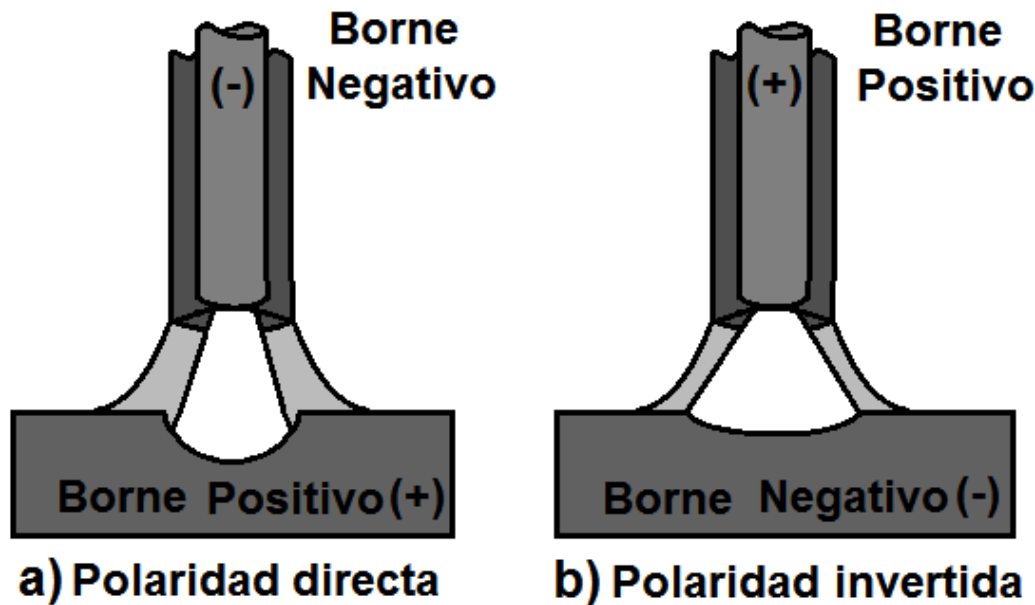
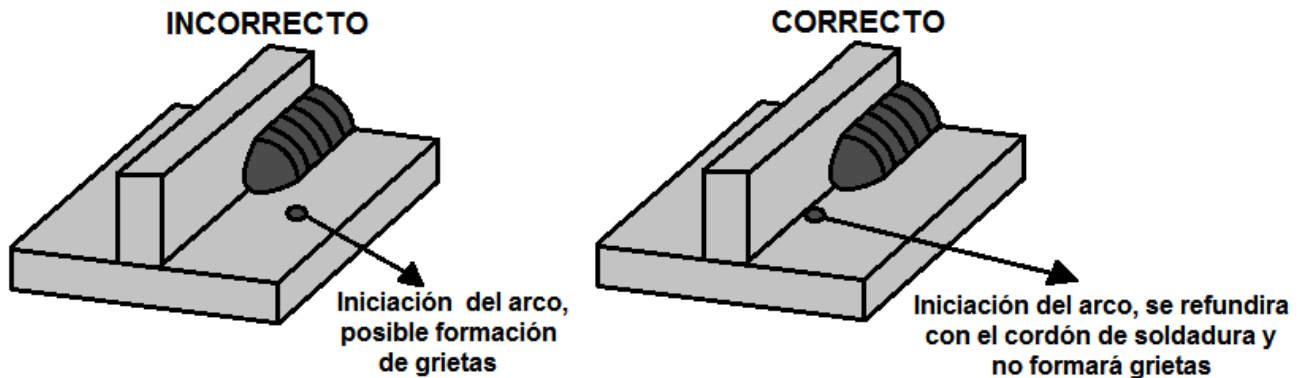


Figura 4.3. Polaridad en el proceso de soldadura SMAW (34, 35)

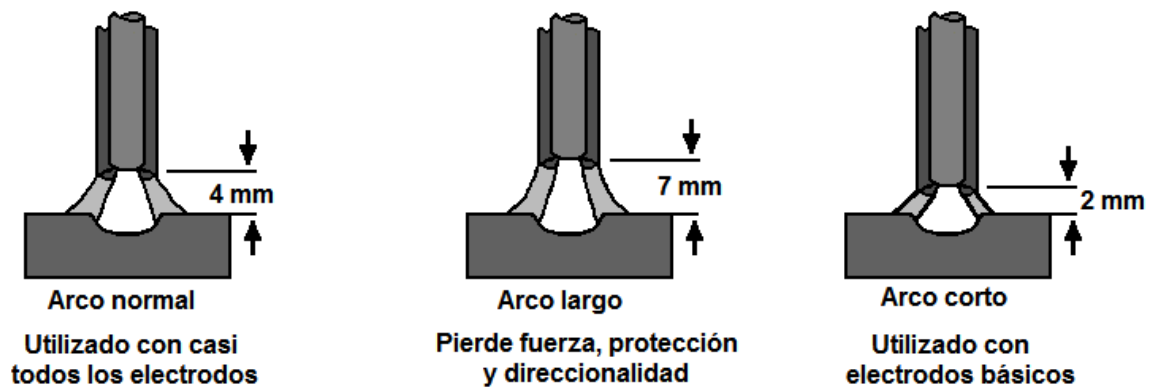
4.1.1. Generación del arco en el electrodo recubierto

El arco se establece golpeando ligeramente el extremo del electrodo sobre la pieza haciendo cortocircuito con el electrodo y la pieza a soldar, a continuación se retira un poco de forma rápida para producir un arco de longitud adecuada. En donde, en el punto de contacto el calentamiento óhmico es tan intenso, que se empieza a fundir el extremo del electrodo y se produce ionización térmica con la estabilización del arco. Este arco eléctrico está formado por la descarga de los electrones que van desde el electrodo negativo al positivo, pero también, por los iones positivos que se mueven en sentido opuesto. El impacto de los

electrones, en el electrodo positivo, lo calienta mucho más que el electrodo negativo, aunque en el electrodo negativo hay impactos de los iones. Para mantener el arco estable y consistente, se le adicionan sustancias químicas en el recubrimiento de los electrodos metálicos, para ayudar a contener y dirigir el arco, que a su vez mejoran las características del cordón de soldadura. En la figura 4.4 se observa un esquema de cómo debe iniciarse el cordón de soldadura en el proceso SMAW.



a) Lugar donde se debe iniciar el arco



b) Longitud de arco para los electrodos del proceso SMAW

Figura 4.4. Esquema de iniciación del cordón de soldadura y longitud de arco en el proceso SMAW (34, 35)

El arco se debe establecer en las proximidades del lugar donde se realizará la soldadura y dentro del bisel. Otra técnica de establecer el arco es mediante un movimiento de raspado similar al de encender una cerilla. Cuando el electrodo toca la pieza, se manifiesta una tendencia a mantenerse juntos, lo cual se evita por medio del golpeteo y del raspado.

Cuando el electrodo se pega es necesario apartarlo rápidamente, de otra forma se sobrecalentará y se unirá a la pieza, con lo cual, los intentos para retirarlo de la pieza sólo conseguirá doblarlo, siendo preciso abrir la pinza porta electrodo y después retirarlo de pieza que se está soldando, incluso con la ayuda de un cortafrío. El establecimiento del arco con electrodos de bajo hidrógeno o para realizar empalmes de soldaduras, se requiere de una técnica especial para evitar la porosidad de la soldadura donde se inicia el arco. La técnica consiste en establecer el arco a una distancia de unos pocos diámetros del electrodo por delante del lugar donde va a comenzar a soldar, luego se mueve el arco hacia atrás y se empieza a soldar de forma normal o se realiza el empalme. La soldadura continúa sobre la zona donde se estableció el arco, refundiendo el metal y cualquier pequeño glóbulo de metal de soldadura que pudiese haberse producido cuando se inició el arco (27, 34, 35).

No se debe interrumpir el arco de forma brusca, ya que pueden producirse grietas y poros en el cráter del cordón de soldadura. El arco puede interrumpirse por medio de diferentes técnicas como acortar el arco de forma rápida y a continuación mover el electrodo lateralmente fuera del cráter. Esta técnica se emplea cuando se va a reemplazar el electrodo ya consumido, continuando el soldeo a partir del cráter. Otra técnica es detener el movimiento de avance del electrodo y permitir el llenado del cráter, retirando el electrodo a continuación. Otra forma es dar al electrodo una inclinación contraria a la que llevaba y se retrocede, sobre el mismo cordón unos 10 mm o 12 mm antes de interrumpir el arco. De esta forma se rellena el cráter.

Una vez depositado un pase completo de soldadura, debe picarse la escoria y cepillar la totalidad del cordón antes de realizar la pasada siguiente, también debe retirarse la escoria en la zona del empalme cuando se ha consumido un electrodo y no se ha finalizado todo el cordón de soldadura. La escoria se debe retirar especialmente en las proximidades de las caras del chaflán que es dónde se puede quedar ocluida, utilizando pica escoria y cepillo o esmeriladora si fuera necesario. También se deberá eliminar el sobre espesor del cordón cuando este sea excesivo antes de depositar el siguiente cordón. Como medida de protección de los ojos el soldador debe de utilizar unas gafas con los cristales transparentes

para picar y cepillar la escoria de la soldadura. Esta escoria se forma del fundente del recubrimiento del electrodo, el cual tiene las siguientes funciones: (18, 27)

- Proveen una atmósfera protectora
- Proporcionan escoria para proteger al metal fundido
- Estabilizan el arco
- Añaden elementos de aleación al metal de la soldadura
- Desarrollan operaciones de enfriamiento metalúrgico
- Reducen las salpicaduras del metal
- Aumentan la eficiencia de deposición
- Eliminan impurezas y óxidos
- Influyen en la profundidad del arco
- Disminuyen la velocidad de enfriamiento de la soldadura

4.1.2. Fuentes de potencia

En el proceso de soldadura con electrodo revestido se trabaja con altas intensidades y bajas tensiones. Este proceso sólo necesita un soldador con una fuente de potencia, cables, un porta-electrodo y electrodos, además de los elementos de seguridad como máscara, casco y guantes de protección. Las compañías eléctricas suministran corriente alterna de baja intensidad y de alto voltaje, parámetros que no resultan adecuados para el manejo del arco. La fuente de energía es el elemento que se encarga de transformar y/o convertir la corriente eléctrica de la red en otra alterna o continua, con una tensión e intensidad adecuadas para la formación y estabilización del arco eléctrico. Dichas fuentes de energía son máquinas eléctricas que, según sus estructuras, reciben el nombre de transformadores, rectificadores o convertidores.

Un aspecto a considerar desde el punto de vista práctico es la relación existente entre la fuente de alimentación y las características del arco. La fuente de energía para la aplicación de soldadura debe presentar una característica tensión-corriente, con una gran pendiente

descendente (de intensidad constante), para que la corriente de soldeo se vea poco afectada al cambiar la tensión de arco (V_a), por las variaciones en la longitud del arco (debidas a las imperfecciones del trabajo manual y a las irregularidades). La corriente y el voltaje reales obtenidos en el proceso de soldeo vienen determinados por la intersección de las curvas características de la máquina y la del arco. Este es el punto de funcionamiento o punto de trabajo definido por la intensidad y tensión de soldeo. Además hay que tener en cuenta que en el momento de encender el arco, tocando la pieza de trabajo con el electrodo ($V_a=0$), la corriente de cortocircuito resultante debe permanecer limitada, normalmente a 1,2 veces la corriente nominal, para no dar origen a perforaciones o defectos cada vez que se inicia el arco. Otro factor a considerar es la tensión en vacío, que debe ser superior a la del arco para facilitar el encendido (18, 34). En la figura 4.5, se observa una curva característica del arco, la fuente de potencia y el punto de funcionamiento del equipo.

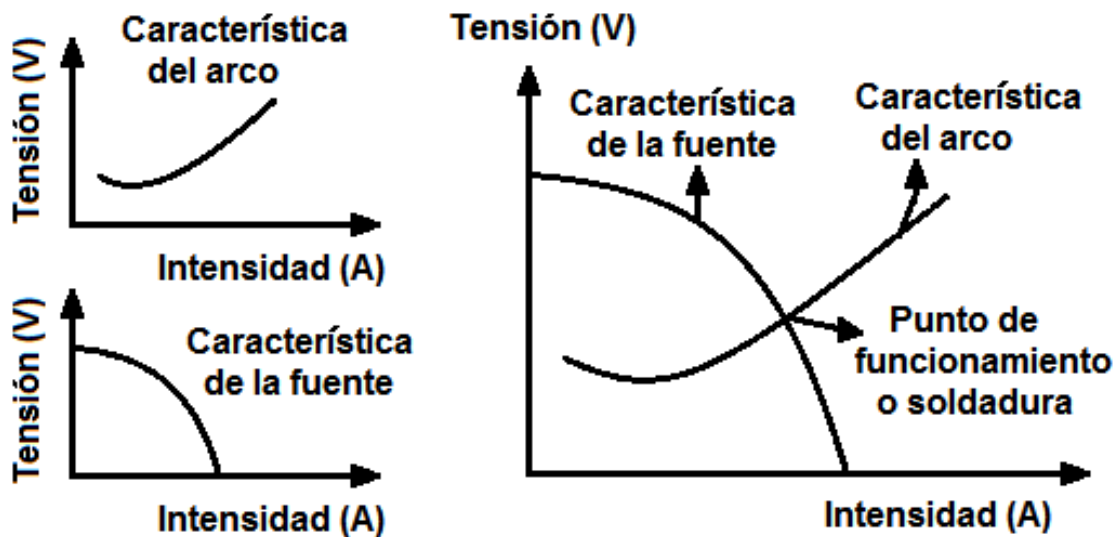


Figura 4.5. Curva característica del arco, la fuente de potencia y el punto de funcionamiento del equipo (34)

La corriente de soldadura se ajusta en función del tipo de electrodo y el trabajo a efectuar, puede hacerse por medio de transformadores con múltiples derivaciones intermedias, o para trabajos de mayor calidad, mediante distintos dispositivos de salida continua y variable, como desplazamiento de bobinas del transformador, tiristores, reóstatos, impedancias

variables por desplazamiento del núcleo y derivador magnético entre otros. Para el soldeo con corriente continua se utilizan rectificadores, mientras que para el soldeo con corriente alterna se utilizan transformadores. Para la selección de la fuente de energía adecuada se debe tener en cuenta el electrodo que se va a utilizar, de forma que pueda suministrar el tipo de corriente (corriente continua - cc o corriente alterna - ca), rango de intensidades y tensión de vacío (OCV) que se requiera. Los electrodos básicos necesitan mayores tensiones de vacío que los otros tipos de revestimientos. Las fuentes de potencia, vienen en distintos tamaños y formas con un costo relativamente bajo. Se conocen muy bien los factores que intervienen en el diseño de las fuentes de potencia que se utilizan en la soldadura con electrodo revestido, y por esa razón es fácil fabricarlas y no se tienen que hacer grandes inversiones en equipo. Normalmente las fuentes de potencia son pequeñas, ligeras y portátiles. Pueden abarcar desde un transformador sencillo para soldadura con corriente alterna, hasta un generador impulsado por un motor de combustión interna o un transformador trifásico con rectificadores para soldadura con corriente continua.

Pinza porta electrodo: Es la responsable de conducir la corriente hasta el electrodo y sujetarlo, por medio de mordazas, las cuales deben mantenerse en perfecto estado para evitar su sobrecalentamiento, ya que conlleva a disminución de la calidad y dificultad para la ejecución de la soldadura. Se debe seleccionar la pinza de acuerdo con el diámetro del electrodo que se va a utilizar.

Conexión de masa: La conexión del cable de masa es muy relevante en la soldadura con corriente continua. Una conexión incorrecta puede provocar el soplo magnético, dificultando el control del arco. Más aún, el método de sujetar el cable también es importante. Un cable mal sujeto no proporcionará un contacto eléctrico consistente y la conexión se calentará, pudiendo producirse una interrupción en el circuito y la desaparición del arco. El mejor método es emplear una zapata de contacto de cobre sujeta con una mordaza. Para piezas giratorias el contacto debe efectuarse mediante zapatas que deslizan sobre la pieza, como mínimo se deben usar dos, para evitar que se extinga el arco si se

suelta una de ellas, o mediante rodamientos en el eje sobre el que la pieza va montada. En la tabla 4.1 se listan algunas ventajas y limitaciones del proceso SMAW.

Tabla 4.1. Ventajas y limitaciones del proceso SMAW (34)

Ventajas	Limitaciones
Equipo de soldeo es relativamente sencillo, económico y portátil	Requiere gran habilidad por parte del soldador
El metal de aportación y los medios para su protección durante la soldadura proceden del propio electrodo revestido. No necesita protección adicional por gases o fundentes.	Es un proceso lento, por la baja tasa de deposición, por lo que en determinadas aplicaciones ha sido desplazado por otros procesos
Es menos sensible al viento o corrientes de aire que los procesos por arco con protección gaseosa, aunque en ocasiones hay que emplear protecciones para el viento.	En teoría se puede soldar cualquier espesor por encima de 1,5 mm, pero el proceso no resulta productivo para espesores mayores de 38 mm, son más adecuados el FCAW y SAW.
Se puede emplear en cualquier posición, en recintos abiertos y cerrados, incluso con restricciones de espacio. No requiere conducciones de agua de refrigeración, ni tuberías o botellas de gases de protección, por lo que puede emplearse en lugares relativamente alejados de la fuente de energía.	No es aplicable a metales de bajo punto de fusión como plomo, estaño y zinc, debido a que el intenso calor del arco es excesivo para ellos. Tampoco es aplicable a metales de alta sensibilidad a la oxidación como el titanio, zirconio, tántalo y niobio, ya que la protección del recubrimiento es insuficiente para evitar la contaminación por el oxígeno.
Es aplicable a la mayoría de los metales y aleaciones, generalmente con espesores, mayores a 2 mm.	No es aplicable a espesores inferiores a 1,5 mm (se podría pero habría que poner una chapa de cobre debajo para que absorba rápido el calor).

4.2. Soldadura por arco con electrodo metálico y gas de protección (GMAW)

La soldadura eléctrica por arco metálico con protección de gas - GMAW (*gas metal arc welding*) por sus siglas en inglés, o soldadura MIG (*metal inert gas*), es un proceso de soldadura que se logra por el calor aportado por un arco eléctrico, el cual es generado y mantenido entre un alambre sólido, que funciona como electrodo continuo consumible, y la

pieza de trabajo. El electrodo es un alambre sólido desnudo que se alimenta de forma continua automáticamente, y se convierte en el metal depositado según se consume. El electrodo, arco, metal fundido y zonas adyacentes del metal base quedan protegidas de la contaminación de los gases atmosféricos mediante un flujo de gas protector que se aporta por la boquilla de la pistola, concéntricamente al electrodo. El arco y la soldadura fundida son protegidos por un chorro de gas inerte o activo como argón, helio o CO₂. El proceso puede ser usado en la mayoría de los metales y la gama de alambres en diferentes aleaciones y aplicaciones es casi infinita. Con lo anterior se genera un arco protegido contra la oxidación y además perfectamente controlado, en cuanto a penetración, sobre espesor y ancho de la soldadura. Es conveniente mencionar que cuando se utiliza un gas de protección activo, debe entenderse como MAG (*metal active gas*). Este proceso, puede trabajar en modo semiautomático y automático, siendo fácilmente adaptado para su utilización con robot. Eligiendo el consumible y gas de protección adecuados, pueden soldarse con este proceso todos los metales y aleaciones utilizados comercialmente (18, 34, 35). En la figura 4.6 se presenta un esquema del proceso GMAW. La soldadura GMAW es más productiva que la soldadura SMAW, donde las pérdidas de productividad ocurren cada vez que el soldador se detiene para reemplazar el electrodo consumido. Además en la soldadura SMAW es notable la pérdida de productividad, cuando la colilla del electrodo (por donde se sujeta el electrodo al porta-electrodo) es tirada a la basura; aunque en muchos casos es reciclado. Por cada kilogramo de varilla de electrodo cubierto comprado, solamente alrededor del 60 % al 75 % es aprovechado como parte de la soldadura, el resto se pierde en humos, escoria o es tirado a la basura en forma de colillas. El uso de alambre sólido del proceso GMAW incrementa la eficiencia de metal depositado entre el 90 % - 98 % (18).

Los continuos desarrollos al proceso de soldadura GMAW, lo han convertido en un proceso aplicable a muchos metales como el acero, aluminio, acero inoxidable, cobre y entre otros. Es simple la selección del equipo, el alambre o electrodo, el gas de la aplicación y las condiciones óptimas para producir soldaduras de alta calidad a muy bajo costo. El proceso GMAW incluye principalmente cuatro técnicas muy distintas: transferencia por corto

circuito, transferencia globular, la transferencia por rociado (*spray*) y arco pulsado, este último se logra por medio de un microprocesador digital. Estas técnicas describen la manera en la cual el metal es transferido, desde el alambre hasta la soldadura fundida, este tipo de transferencia y su tamaño están determinados por factores como el tipo y la magnitud de la intensidad de la soldadura, el diámetro del alambre y su composición, la longitud del electrodo entre la punta de contacto y el arco (*stick out*), la longitud de arco o voltaje y la composición del gas de protección entre otras (18, 34).

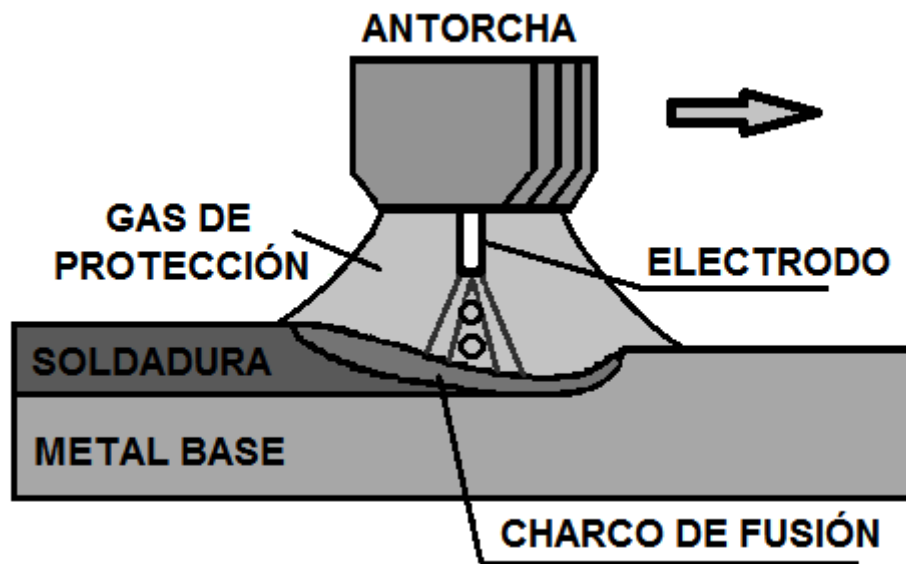


Figura 4.6. Esquema del proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo metálico y gas de protección (8, 18)

Los equipos que manejan el arco pulsado reducen la salpicadura y pueden manejar automáticamente la curva de corriente, la forma y el número de pulsos, con solo ingresar al equipo el tipo de material a soldar, diámetro del alambre, velocidad y tipo de gas de protección. La capacidad y calidad del proceso GMAW se ve fuertemente afectada por las características de la transferencia de metal, como el tamaño de gota y la frecuencia de transferencia. Por lo tanto, se han hecho grandes esfuerzos para construir una mejor comprensión del comportamiento de la transferencia de metal y su mecanismo de deposición. En la transferencia globular, la fuerza de tensión superficial es la fuerza más fuerte que actúa sobre la gota colgante, luego la fuerza de gravedad y la fuerza más débil es

la electromagnética. Además, la fuerza de tensión superficial casi se equilibra con la gravedad y la fuerza electromagnética en la dirección axial en el momento de separación de la gota. La fuerza más influyente en la transferencia en spray es la fuerza electromagnética en el componente radial, y no existe el balance de fuerza en la dirección axial. La transferencia de metal en el medio de la transición (globular - spray), muestra una bifurcación en la frecuencia de desprendimiento de la gota y su tamaño. Las gotas con un diámetro mayor que el alambre y con un diámetro menor que el alambre aparece alternativamente (36, 37, 38).

La transferencia de metal que se realiza por corto circuito, también conocida como "arco corto" o "transferencia espesa", ocurre porque la relación entre la velocidad de fusión del electrodo y su velocidad de alimentación, dentro de la zona de soldadura, hace que se alterne de modo intermitente el arco eléctrico y el cortocircuito entre el electrodo y el metal base. El electrodo que es alimentado a una velocidad constante, la cual supera la velocidad de fusión, conllevando a que el alambre entre en contacto con el metal base y se produzca el corto circuito, desapareciendo el arco eléctrico. La fuente de potencia hace que la intensidad de corriente comienza a fluir a través del alambre y se produzca el calentamiento del alambre hasta llevarlo al estado plástico. En este momento, el alambre comienza a estrangularse y se forma la gota que se transfiere al baño de fusión debido a la fuerza electromagnética, pero la impedancia eléctrica restablece el suministro de potencia, evitando que se produzca el chisporroteo de la gota que forma el puente y una vez transferido el metal se vuelve a establecer el arco.

La transferencia por arco corto (cortocircuito), se obtiene con bajos niveles de intensidad. La transferencia de metal del electrodo a la pieza se produce únicamente durante el periodo en que están en contacto, esto sucede entre 60 - 150 veces por segundo. La mayor o menor transferencia de metal puede ser controlada ajustando la inductancia de la fuente de alimentación, que variará la velocidad de aumento de la intensidad en el momento del cortocircuito. Variando por tanto los tiempos de cortocircuito y de arco, se puede regular el calor aportado a la pieza y el tamaño del baño fundido. Este modo de transferencia se

emplea para soldaduras de espesores delgados debido a su baja entrada de calor, lo permite soldar en cualquier posición y también sirve para puntear preparaciones con espacio excesivo. La mayoría de soldaduras con arco corto se realizan con alambres de diámetro pequeño que van de 0,8 mm a 1,2 mm de diámetro. Este proceso es relativamente frío, por lo que es conveniente para soldar láminas, sin quemarlas, pero existe la posibilidad de una fusión incompleta, sino se utiliza la técnica correcta. Generalmente se usa con dióxido de carbono o mezclas de argón y dióxido de carbono y gases de protección a base de helio (34, 35).

En la transferencia por rociado (spray) al baño fundido, las gotas finas de metal son menores al diámetro del alambre y se da en cientos por segundo. Las gotas saltan una a continuación de otra, pero no están interconectadas, lo anterior debido a la alta corriente que hace que las gotas sean más pequeñas que el diámetro del alambre. Las gotas son aceleradas por el campo magnético, en vez de transferirse por gravedad como en el arco globular y son absorbidas dentro del baño de fusión en vez de salpicar. Generalmente se utiliza como gas de protección el argón o gases ricos en argón. Para cada tamaño de electrodo, hay un umbral de corriente, que por encima de este, el metal se separa en diminutas gotas de metal fundido varias veces por segundo. Estas gotas son arrancadas de la punta del alambre y proyectadas por la fuerza electromagnética hacia la soldadura fundida. Este proceso provoca una alta entrada de calor y máxima penetración, por lo cual, para la soldadura de acero, generalmente está limitada a las posiciones a tope, plana y soldadura en ángulo horizontal. (Ver figura 4.7). Todos los aceros, al carbono e inoxidables, y la mayoría de los otros metales pueden soldarse por arco en spray. La transferencia por este método es un proceso limpio y de elevada eficiencia. Se pueden emplear todos los diámetros de alambre. Para la mayoría de las aplicaciones el rango de intensidades es de 175 A a 500 A para alambres de 0,9 mm a 1,6 mm de diámetro. Si el equipo está ajustado correctamente, hay poca salpicaduras, y el 96 % – 98 % del alambre de soldadura es depositado en el baño de fusión.

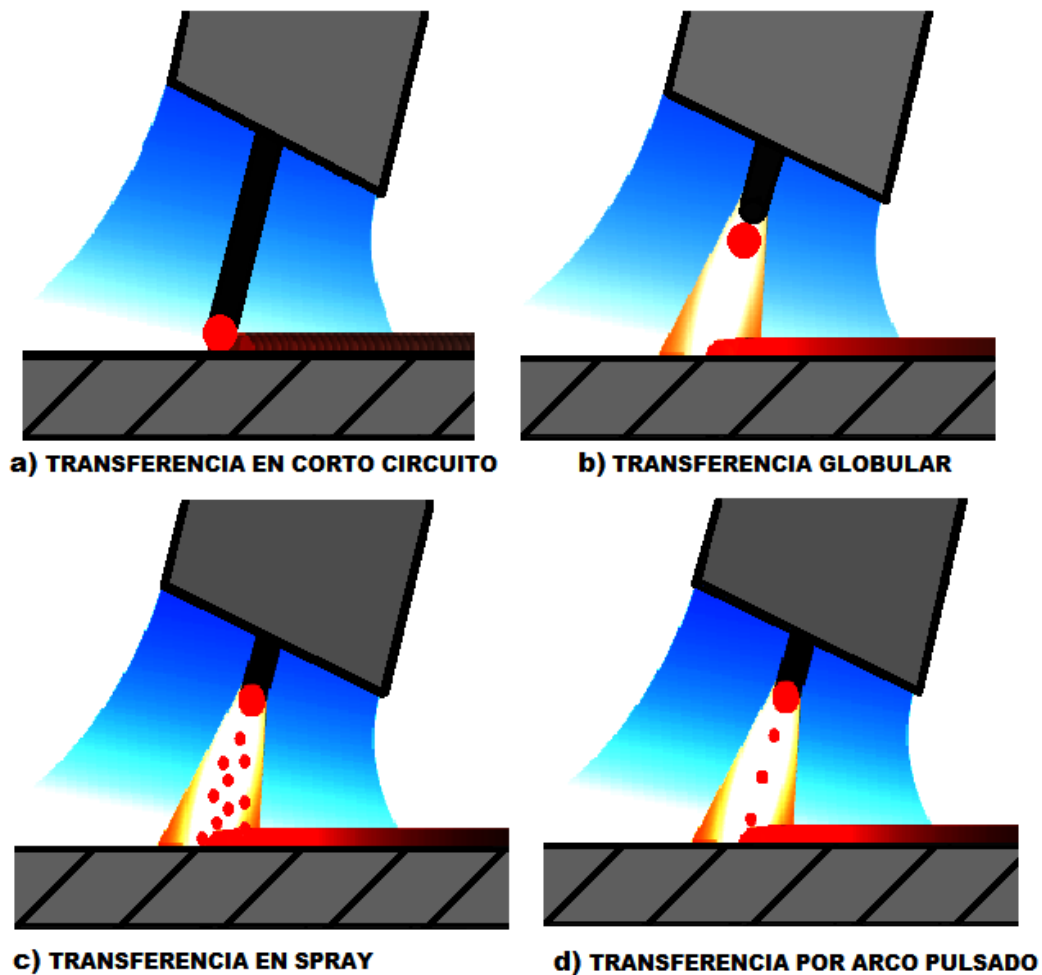


Figura 4.7. Tipos de transferencia del metal en el proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo metálico y gas de protección (18, 36)

La transferencia por globular se caracteriza por la formación de una gota relativamente grande de metal fundido en el extremo del electrodo. Esta transferencia ocurre cuando el ajuste de voltaje e intensidad corriente, superan a los del cortocircuito, manteniendo una baja densidad de corriente con relación al tamaño del electrodo. Esta gota se va formando y sosteniendo por la tensión superficial hasta ser lo suficientemente grande, para caer por la fuerza de gravedad y van acompañadas de proyecciones. El arco está saltando continuamente entre la parte de la gota que está más próxima al metal, donde sólo es necesario un voltaje mínimo para sostener el arco. Cuando la fuerza de gravedad supera a la fuerza de tensión superficial, la gota cae y golpea en el metal base, produciéndose las

salpicaduras que salen del baño y caen al metal base. A diferencia de la transferencia con arco corto, se presenta arco eléctrico la mayor parte del tiempo. La transferencia globular se caracteriza por dar lugar a un gran tamaño de gota del orden de 2 a 4 veces más grande que el diámetro del alambre. Este tipo de transferencia ocurre con todos los tipos de gas de protección. Este tipo de transferencia es la que produce más salpicaduras y por tal motivo no es muy empleada debido a la baja eficiencia del proceso, pudiendo llegar a producir hasta un 15 % del metal soldado en salpicaduras.

La soldadura por arco pulsado mantiene una baja intensidad de corriente de arco e inyecta pulsos de alta intensidad a intervalos regularmente espaciados en dicha corriente de arco, los pulsos están por encima del nivel del umbral, por lo tanto, la transferencia del metal aportado se produce por pulverización axial durante cada pulso. La intensidad superior se llama “pico” y la intensidad baja se llama intensidad “base” o “fondo”. Esta intensidad base normalmente es de 20 A - 40 A y sirve para mantener el arco, así como para precalentar el electrodo que avanza continuamente. Cuando la intensidad de corriente se eleva a la intensidad pico se transfiere una gota en spray, al metal fundido. El resultado es producir una transferencia que combina una baja entrada de calor asociado con una transferencia limpia, sin salpicaduras y con buena penetración. Mediante esta técnica se pueden soldar secciones delgadas (inferiores a 3 mm), sin proyecciones, con menores deformaciones, y se puede soldar en todas las posiciones. Los equipos inversores pulsados, tienen una mayor velocidad de subida de intensidad, con lo cual pueden reducir la cantidad de humos asociada con la soldadura MIG con elevada intensidad. Parte de los humos se originan por el sobrecalentamiento del alambre y la rápida subida de la intensidad, reduce el sobrecalentamiento, reduciendo la generación de humos.

4.2.1. Equipo de soldadura para el proceso GMAW

El equipo de soldadura para el proceso GMAW consta de varias partes como la pistola o antorcha de soldadura, el alimentador de alambre, el control, la fuente de energía, el gas de protección, el alambre o electrodo, los cables y mangueras de conexión entre otros.

4.2.2. Pistola o antorcha de soldadura

El alambre o electrodo debe moverse a través de la pistola a una velocidad preestablecida y constante. La pistola debe transmitir la corriente al alambre y transportar el gas de protección. Además de lo anterior, puede tener un sistema de enfriamiento de la pistola, por agua o por aire (sólo con el gas de protección), con sus respectivos controles de alimentación del electrodo y gases de protección, los cuales hacen más compleja la pistola del proceso GMAW que el porta electrodo del proceso SMAW. La longitud de la manguera de la pistola debe ser lo más corta posible y también debe evitarse que se formen bucles para facilitar el arrastre. Por lo general la longitud es de 3 m a 5 m para alambre de acero y de 2 m a 3 m para aluminio. Se comercializan de diferentes tipos de pistolas; para soldadura manual o semiautomática y automática, además de pistolas para elevadas intensidades de corriente refrigeradas por agua y ligera sin refrigeración. Los elementos esenciales de ésta son, la boquilla de gas (10 mm - 20 mm de diámetro interior), punta de contacto, conducto de alimentación o guía, cable de energía, mangueras de gas de protección, el interruptor y las mangueras de refrigeración por agua cuando sea necesario. En el caso de las pistolas para procesos automáticos están sujetas y guiada por medios mecánicos, pero tienen los mismos componentes que en las pistolas manuales. Cuando se aplican cordones de soldadura con intensidades de corriente superiores a 250 amperios, es necesario utilizar pistolas refrigeradas por agua, ya que la refrigeración de la pistola por el propio gas de protección sería insuficiente. La alimentación de agua para tal refrigeración puede hacerse desde un simple grifo dispuesto cerca de la máquina de soldadura, o con un sistema de circuito cerrado, siendo este último el más habitual. La activación de la refrigeración por agua es controlada por una electroválvula de manera similar al gas de protección.

Alimentador de alambre: El alimentador de alambre es el dispositivo que hace que el alambre pase por la punta de contacto de la pistola para fundirse en el arco. Tiene una gran importancia, ya que la calidad y el aspecto de las soldaduras dependen de que la velocidad de alimentación del alambre sea lo más constante posible, por tal motivo no debe haber

deslizamientos en los rodillos. Otro aspecto importante es que la alimentación sea instantánea. La mayoría de los alimentadores son de velocidad constante, es decir, la velocidad es establecida antes de que comience la soldadura, y la alimentación comienza o finaliza con el interruptor situado en la pistola. En el caso de que el sistema de alimentación sea de velocidad variable, éste se limita a la soldadura de espesores grandes (superiores a 1,6 mm), donde las velocidades de alimentación son más bajas. Los sistemas de alimentación de alambre pueden ser de empuje, de arrastre o combinados de empuje-arrastre. El tipo de sistema depende fundamentalmente del tamaño y composición del alambre usado y, a veces, de la distancia entre la bobina de alambre y la pistola (34, 35). En la figura 4.8 se observan componentes del equipo usado en el proceso GMAW.

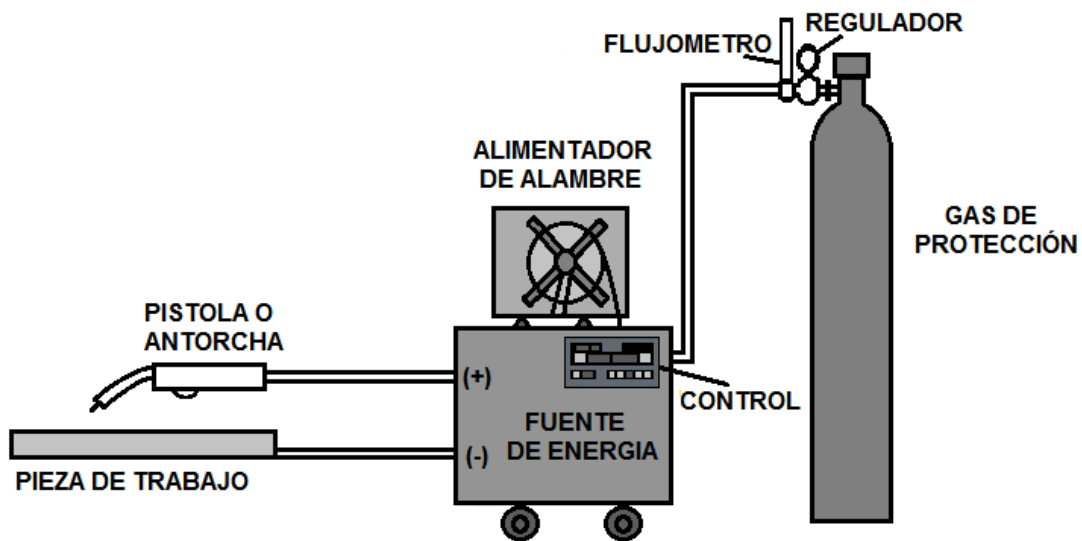


Figura 4.8. Esquema del equipo básico del proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo metálico y gas de protección - GMAW (18, 34)

Control: La principal función del control es regular la velocidad de alimentación de alambre. Incrementando la velocidad de alimentación cuando se incrementa la intensidad y disminuyéndola cuando se reduce la intensidad. En control también regula el inicio y la parada de alambre a través de la señal enviada desde el interruptor de la pistola. Además, el control normalmente se encarga de regular el pre flujo y post flujo de gas de protección. En muchos casos, tienen incorporados el sistema “*touch star*”, en el cual el alambre comienza a alimentarse en el momento de tocar el metal base.

Fuente de potencia: El proceso GMAW opera con corriente directa, usualmente con la pistola del alambre al electrodo positivo, esto es conocido como polaridad invertida. La polaridad directa y la corriente alterna son raramente usadas, por su poca transferencia de metal de aporte, desde el alambre hacia la pieza de trabajo: La polaridad directa se usa ocasionalmente cuando la penetración tiene que ser mínima, utilizando bajos voltajes para compensar la penetración de la polaridad. La fuente de alimentación es básicamente un transformador/rectificador que toma una corriente alterna de elevado voltaje (220 V a 380 V) y baja intensidad (20 A a 50 A) y la transforma en corriente continua de bajo voltaje (15 V - 40 V) y elevada intensidad de 40 A a 500 A. Un arco auto-estabilizado es obtenido con el uso de un sistema de fuente de potencia, con potencial constante (voltaje constante), o corriente constante (Amperaje constante), y una alimentación constante del alambre; para este proceso se prefiere las fuentes de potencia de voltaje constante. Los factores que determinan la manera en que los metales son transferidos son la corriente de soldadura, el diámetro del alambre, la distancia del arco (voltaje), las características de la fuente de potencia y el gas utilizado en el proceso.

Suministro de gas de protección: La alimentación de gas de protección puede hacerse desde una botella de gas comprimido o desde un suministro centralizado. Cuando se hace desde una botella, es necesario conectar a la válvula de esta, un regulador – flujometro que permita poder graduar el caudal de gas de protección necesario para cada aplicación. Los dos flujometros utilizados son de indicador de caudal por manómetro y de indicador de caudal por flotámetro. Para poder cubrir las diferentes aplicaciones de soldadura MIG, generalmente pueden suministrar un caudal regulado entre 0 y 30 litros/minuto. Se prefieren los flujometros con flotámetro cuando la aplicación requiere un control más riguroso del caudal del gas de protección. Cuando el gas de protección es CO₂ o mezclas con alto contenido en CO₂, puede ser necesario colocar un calentador de gas antes del flujometro, para evitar que el frío producido por la expansión del gas pueda hacer que se congele y lo averíe. Antes de llegar el gas de protección a la pistola, este gas pasa por la electroválvula, dejándolo pasar durante el tiempo que dura la soldadura e interrumpiendo su paso cuando no se está soldando. Mediante temporizadores, puede ajustarse la apertura y

cierre de la electroválvula con relación al tiempo de soldadura, para fijar el preflujo y postflujo de gas y así evitar dejar sin protección el baño fundido al inicio y final de la soldadura (34, 35, 39).

4.2.3. Alambre del electrodo

La Sociedad Americana de Soldadura AWS (*American Welding Society*), tiene una clasificación para los metales de aporte del proceso GMAW, según la especificación AWS-A5.18, la cual se explica con detalle en el siguiente capítulo, en donde el alambre del electrodo debe tener una composición química bien definida y controlada, su condición superficial debe ser buena y las variaciones del diámetro deben ser mínimas, ya que estas características tienen gran influencia en la alimentación del alambre. Para proteger las superficies durante el almacenamiento y suministrar un buen producto, la mayoría de los electrodos de acero son recubiertos con cobre para evitar la oxidación superficial del material. Lo que determina la ejecución correcta de este proceso es la fluidez de la soldadura fundida, las salpicaduras o chisporroteo y la forma del cordón de la soldadura y sus bordes.

Un buen procedimiento de soldadura está caracterizado por la poca presencia de discontinuidades, buena fusión, y un acabado libre de grietas o quebraduras. Típicamente, el proceso MIG es reconocido como un proceso de muy poca deposición de hidrógeno. Factores como la humedad en el gas protector, condiciones atmosféricas y las condiciones del metal a ser soldado, podrían tener una variación en el grado del efecto del hidrógeno sobre el material depositado.

4.2.4. Control de discontinuidades

La porosidad es una consecuencia de una soldadura pobremente ejecutada, esta es causada por una protección gaseosa inapropiada, que permite al oxígeno y al nitrógeno de la atmósfera reaccionar con el carbono del metal soldado, formando diminutas burbujas de

monóxido de carbono (CO), o disolviéndose en el metal fundido. Algunas de estas burbujas pueden quedar atrapadas en la soldadura fundida después que se enfría y se convierten en poros. Una suficiente desoxidación del cordón de soldadura es necesaria para minimizar la formación de monóxido de carbono CO y por consiguiente la porosidad. Para lograr esto, algunos fabricantes han desarrollado alambres que contienen elementos, con los cuales el oxígeno se combina preferentemente al carbón para formar escorias inofensivas. Estos elementos, llamados desoxidantes, son el manganeso, silicio, titanio, aluminio, y zirconio. El aluminio, titanio y zirconio son los desoxidantes más poderosos, quizás cinco veces más efectivos que el manganeso y el silicio, no obstante estos últimos dos elementos afectan de manera especial el proceso y por eso son ampliamente utilizados.

Las inclusiones de escoria pueden aparecer en este proceso, aunque no se emplee fundente, ya que el exceso de oxígeno presente en el metal base o el oxígeno introducido en el arco durante la soldadura, por una protección deficiente, puede formar óxidos en el metal fundido y pueden quedar atrapados. La fusión incompleta es otra discontinuidad o defecto presente en este tipo de soldadura. La penetración incompleta y la falta de fusión de la junta tiene mayor probabilidad de que ocurra en la transferencia por corto circuito y globular. Las mordeduras y falta de llenado reflejan una pobre técnica del soldador y los agrietamientos son producidos por esfuerzos generados por un calentamiento o enfriamiento rápido en la soldadura por arco, este calentamiento ocurre a lo largo del borde de penetración y es creado por esfuerzos en la soldadura. En la figura 4.9 se observa cómo se transfiere el alambre o electrodo al metal base.

4.2.5. Importancia de la fluidez

La fluidez de la soldadura líquida en el cordón de soldadura es muy importante por varias razones. Cuando la soldadura fundida es suficientemente fluida en su estado líquido, esta tiende a moverse sola, llenando los espacios hasta los bordes, produciendo una forma rasa, con formas mejor presentadas, especialmente en las soldaduras de filetes. Esto es muy importante para las soldaduras de corto circuito de multi-paso, donde un defecto de

"carencia de fusión", puede ocurrir si la forma en los pasos iniciales es pobre. Soldaduras rasas, bien moldeadas, son también bien apreciadas cuando la apariencia es una de las principales preocupaciones y donde el uso de esmeriles sea necesario para llegar a cumplir los requerimientos del trabajo. Pero la excesiva fluidez podría generar problemas en la ejecución de la soldadura en ciertas posiciones o haciendo soldaduras sobre filetes cóncavos horizontales. Las variables que más influencia tienen en el proceso de soldadura MIG son la intensidad, la polaridad, el voltaje de arco, la velocidad de soldadura, la extensión de electrodo (*stick out*), el diámetro de electrodo y el gas de protección.

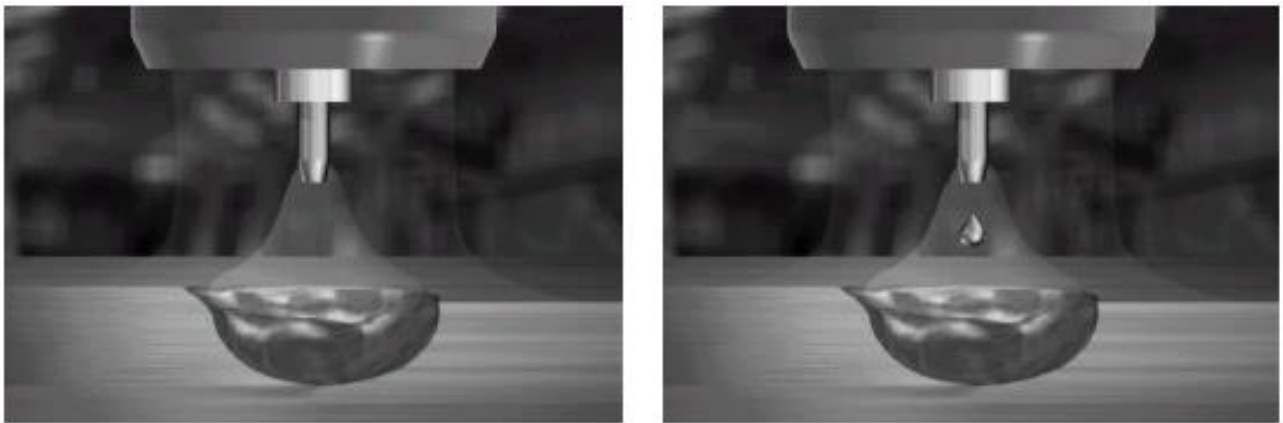


Figura 4.9. Transferencia del metal en el proceso GMAW (8, 18)

Intensidad: La intensidad varía de forma lineal con la velocidad de alimentación del alambre, cuando las intensidades de corrientes son bajas, todo esto manteniendo las otras variables constantes. Para intensidades elevadas se pierde la proporcionalidad, debido probablemente al aumento de resistencia del circuito por calentamiento en la extensión del electrodo. Manteniendo constante las otras variantes, un incremento de la intensidad tendrá como resultado el incremento en la profundidad y anchura de la penetración, se aumentará velocidad de deposición y la dimensión del cordón de soldadura.

Polaridad: La polaridad se utiliza para definir la conexión eléctrica de la pistola con relación a los polos de una fuente de alimentación de corriente continua. Cuando la pistola está conectada al polo negativo, la polaridad se define como corriente continua electrodo negativo (CCPN) o polaridad directa (CCPD). Cuando la pistola está conectada al polo

positivo, la polaridad se define como corriente continua electrodo positivo (CCPP) o polaridad invertida (CCPI). La mayoría de las aplicaciones MIG utilizan corriente continua polaridad invertida. Con esta conexión, se puede obtener para un amplio rango de intensidades, un arco estable, unas transferencias de metal suaves, bajas proyecciones y unos cordones con buenas características y con penetración adecuada.

Voltaje de arco: El voltaje de arco y la longitud de arco, son términos diferentes, pero que están relacionados. Un aumento o disminución del arco o voltaje del arco producirán un aumento o disminución proporcional de la longitud del arco. El voltaje del arco no sólo depende de la longitud del arco sino que también de otras variables como el gas de protección, composición y diámetro del alambre. Cuando incrementamos la longitud del arco, la superficie cubierta por este en la pieza será mayor produciendo una zona fundida más amplia, menos profunda y con un cordón más plano y más ancho que con un arco más corto, en el cual el calor y la energía están más concentrados. Los voltajes demasiado altos (arcos muy largos) ocasionan mala protección e inestabilidad, dando origen a porosidad, proyecciones y mordeduras cuando se cubre más superficie con el arco que la que corresponde a la cantidad de material aportado.

Velocidad de soldadura: La velocidad de la soldadura se define como la velocidad lineal a la cual el arco se mueve a lo largo de la unión. Manteniendo constante el resto de las variables, la penetración es máxima para algunos valores intermedios de la velocidad de soldadura. Sin embargo, a muy bajas velocidades, la penetración disminuye porque el arco incide sobre el baño fundido de tamaño grande, en lugar de hacerlo sobre el material base. Cuando incrementamos la velocidad, la energía por unidad de longitud de soldadura transmitida al metal base por el arco, se incrementa, ya que el arco actúa más directamente sobre el metal base.

Extensión del electrodo o longitud de alambre. La extensión del electrodo es la distancia entre el extremo de la punta de contacto y el extremo del alambre. Al aumentar la longitud de alambre, aumentará la resistencia eléctrica y se elevará la temperatura del alambre. Este

precalentamiento hará que el alambre necesite menos intensidad para fundirse, y se producirá un pequeño incremento de la velocidad de fusión del alambre y originará un exceso de material aportado. Manteniendo constante el resto de parámetros, se obtendrá para las menores longitudes de alambre (6 mm a 13 mm) una transferencia de material en cortocircuito, y para longitudes mayores (13 mm a 25 mm) una transferencia globular o en spray.

Diámetro de electrodo: La velocidad de respuesta del electrodo a los cambios de longitud del arco es mayor cuanto menor es el diámetro del electrodo, puesto que es más fácil su fusión cuanto menor es el diámetro. Esto mejora la capacidad de autorregulación y por tanto el arco es más estable con electrodos de diámetros pequeños. Además se obtiene mayor profundidad de penetración, puesto que al disminuir el diámetro, aumenta la densidad de corriente y disminuye la sección del cono del arco, con lo que a igualdad de intensidad habrá más concentración de calor con un electrodo más fino, y por tanto un cordón más estrecho y profundo.

Gases de protección: La función principal del gas de protección es la de desplazar el aire de la zona de soldadura para proteger el metal fundido, el charco de soldadura y el electrodo, para evitar su contaminación. Si bien los gases inertes puros protegen el metal depositado de las reacciones con el aire, no son adecuados para todas las aplicaciones de soldadura. Mezclando cantidades controladas de gases activos, con gases inertes, se obtienen simultáneamente un arco estable y una transferencia de metal sin salpicaduras. Son muy pocos los gases activos utilizados en la soldadura, entre ellos podemos destacar al CO_2 , oxígeno, nitrógeno e hidrógeno. Como regla general, no es conveniente usar gases activos solos. El CO_2 es la excepción, puesto que es adecuado su uso solo, mezclado con gases inertes o con oxígeno. El resto de gases se emplea en forma de pequeñas adiciones a un gas inerte, habitualmente el argón. La selección de gas de protección es muy importante ya que depende del tipo de metal a soldar, del espesor, proceso, requisitos de calidad y factores metalúrgicos, sin olvidar el coste. En general en los metales no férricos se emplea el argón, helio o mezclas entre ambos. En los materiales férricos se emplean adiciones de

oxígeno o dióxido de carbono puro. Otros factores en los que influye en la selección del gas de protección son el tipo de transferencia de metal, la estabilidad del arco, la cantidad y la calidad de los humos, las propiedades mecánicas, la penetración, tipo y tamaño de cordón, la velocidad de soldadura, los costos de soldadura y la cantidad de energía que pasa a través del arco eléctrico

4.2.6. Influencia del gas y el arco de la soldadura

El principal propósito del gas de protección es proteger el baño fundido y la zona afectada térmicamente de la oxidación. La utilización del gas de protección elimina la escoria, por lo cual se eliminan el tiempo y el costo de la remoción de escoria, aunque los gases inertes puros son capaces de proteger los metales a cualquier temperatura, pero no son apropiados para todas las aplicaciones de soldadura. Mezclando gases reactivos con gases inertes puros, se mejora la acción del arco y la transferencia del metal, sin disminuir la efectividad de la protección gaseosa. El argón puro se puede utilizar como gas de protección para todos los metales, pero ordinariamente no se emplea para soldar aceros, ya que la soldadura de acero al carbono con argón, generalmente produce mordeduras a lo largo del cordón de soldadura, además de su alto precio (18). En la tabla 4.2 se presentan algunas ventajas y limitaciones del proceso GMAW. Las mezclas de gases (oxígeno y dióxido de carbono), con argón (Ar), proveen transferencias de metales más estables y uniformes, buena forma del cordón de soldadura y las salpicaduras son reducidas al mínimo, Estas mezclas disminuyen la profundidad de la penetración, pero aumentan el mojado y la fluidez del metal líquido a lo largo de los bordes de fusión, en la soldadura de aceros al carbono y aceros de baja aleación, reduciendo sustancialmente las mordeduras, además de un intervalo más bajo en la generación de humo. El uso de dióxido de carbono (CO₂), causa más turbulencias en la transferencia del metal del alambre al metal base, con la tendencia a crear cordones de soldadura más abultados y un alto incremento de las salpicaduras, sin embargo, se obtiene una buena velocidad de avance y una buena penetración, además es ampliamente usado para soldar aceros, en la modalidad de transferencia de metal, por corto circuito y globular. El incremento en el voltaje del arco tiende a incrementar la fluidez,

haciendo las soldaduras más rasas, afectando la penetración de los bordes y generando más salpicaduras, los voltajes más bajos reducen considerablemente la penetración (18, 39).

Tabla 4.2. Ventajas y limitaciones del proceso GMAW (34)

Ventajas	Limitaciones
Es el único proceso con arco eléctrico y electrodo consumible que puede soldar casi todos los metales y aleaciones que se utilizan comercialmente	Tiene más dificultad que el proceso de electrodo revestido para acceder a uniones de difícil acceso ya que es necesario aproximar la pistola a la unión entre 10 y 20 mm para asegurarse que la soldadura está protegida por el gas.
La soldadura se puede hacer en todas las posiciones.	El equipo es más complejo que el proceso de electrodo revestido
En comparación con el proceso de electrodo revestido, puede utilizar una alimentación continua de electrodo, logrando mayor velocidad de soldadura y de deposición, con incremento de la productividad	La soldadura debe protegerse del viento y de las corrientes de aire que pueden arrastrar el gas de protección. Esto limita la utilización del proceso a emplearse dentro del taller a no ser que se proteja adecuadamente la zona de soldadura en campo
Pueden adaptarse a la soldadura con automatismos y robot	Al no haber escoria, las soldaduras se enfrían más rápidamente, lo cual puede producir agrietamiento en ciertos aceros.
Pueden realizarse soldaduras de gran longitud sin paradas y la limpieza es mínima después de la soldadura.	Para espesores mayores de 13 mm hay otros procesos de soldadura que resultan más económicos a igualdad de calidad.

4.3. Soldadura por arco con varilla tubular (FCAW)

La soldadura con alambre tubular “*flux cored*” se considera un proceso diferente al GMAW que se denomina FCAW. La soldadura por arco con varilla tubular, la cual contiene fundente en su núcleo, es un proceso en el cual se genera un arco entre la varilla tubular continua de metal de aporte y la pieza a soldar, La protección se obtiene de forma parcial o total por parte del fundente dentro del electrodo que tiene funciones similares a la del revestimiento de los electrodos revestidos. Algunos electrodos son auto protectores y no

requieren de un gas de protección extra para producir buenas soldaduras, mientras otros electrodos utilizan una protección externa adicional gaseosa, comúnmente dióxido de carbono, la cual es suministrada externamente. Cuando el proceso se utiliza con un suministro de gas externo, el equipo de soldadura es prácticamente idéntico al de un MIG (18). Una variable importante a tener en cuenta en este proceso, es la extensión del alambre (*stick out*), que variará en función del tipo de alambre tubular que se esté usando. En el caso de alambres tubulares auto protectores (sin gas), se suelda con largas extensiones del alambre, entre 25 mm y 50 mm. Esto hace que el alambre esté precalentado antes de consumirse en el arco, pudiendo ser mayor la velocidad de aportación. El aumento de extensión introduce una mayor resistencia en el circuito, bajando la corriente y disminuyendo la tensión y la longitud del arco. Esto hace que esta variante sea más adecuada para chapa fina. Cuando se usa alambre tubular protegido con gas no se puede usar una extensión del electrodo grande (entre 20 mm y 40 mm), porque la soldadura quedaría desprotegida, además cuando la extensión del electrodo se alarga en exceso se pueden obtener arcos fríos con muchas proyecciones y solapes. Al estar presente el CO₂ en el gas de protección éste da mayor potencia al arco y mayor penetración, produciendo cordones más estrechos y más profundos.

El proceso de soldadura con alambre tubular se utiliza principalmente en la soldadura de aceros al carbono, de baja aleación o media aleación, aceros de alta resistencia, aceros templados, aceros forjados, aceros inoxidables, hierro fundido, en la soldadura de mantenimiento y como recubrimientos duros. Este proceso puede ser semiautomático o automático, donde el equipo básico es muy similar al utilizado en el proceso MIG, además se utiliza principalmente para soldaduras de acero al carbono, de baja o media aleación, aceros de alta resistencia, aceros templados y forjados, algunos aceros inoxidables, hierro fundido, en soldadura de mantenimiento y como recubrimientos duros. El proceso se utiliza principalmente con CCPI (electrodo al polo positivo) pero también puede utilizarse con CCPD (electrodo al polo negativo) dependiendo de la composición del alambre tubular. En la figura 4.10, se observa un esquema de la soldadura FCAW.

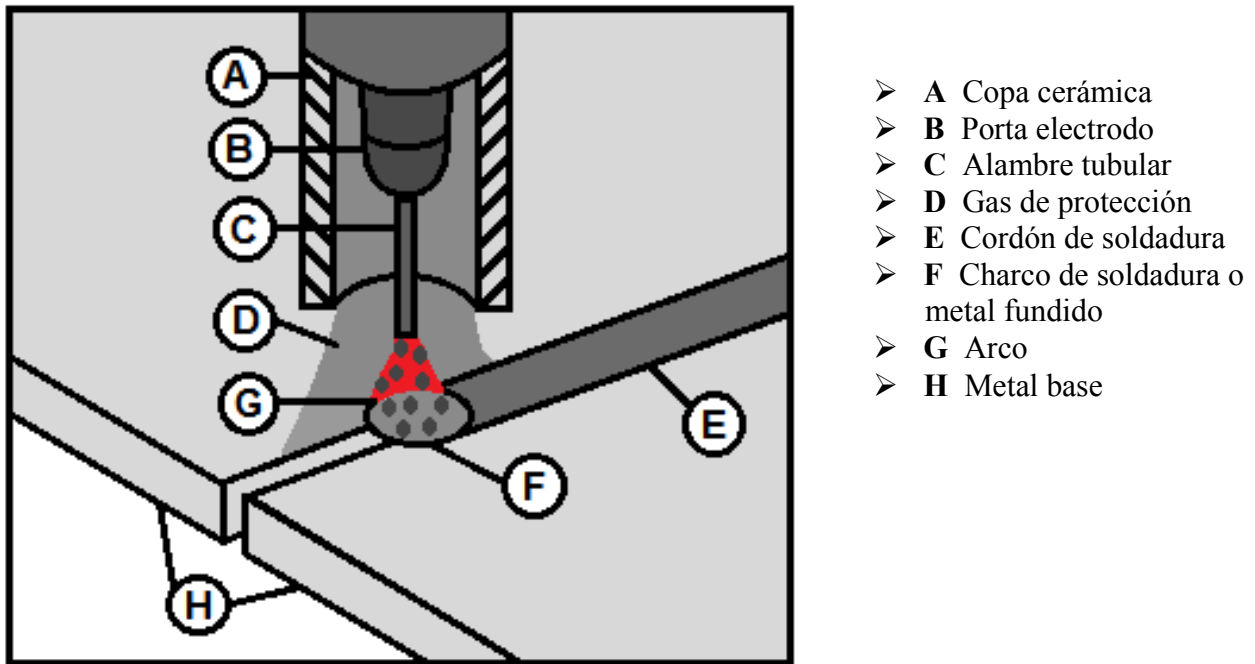


Figura 4.10. Esquema del proceso de soldadura por arco eléctrico con varilla tubular y gas de protección (8, 18)

Este proceso es de alta productividad y velocidad de aporte, con mayor economía y rendimiento por kilogramo depositado que el GMAW. El inconveniente es la existencia de escoria del fundente interior del electrodo, así como la mayor cantidad de humos desprendida durante la soldadura, especialmente con alambres tubulares auto-protectores. Esto obliga a la utilización de extractores que en ocasiones se incorporan a la propia pistola de soldadura. Hasta ahora, se considera que la calidad obtenida por el proceso “*flux cored*” es similar al GMAW y se continua trabajando en su desarrollo para aprovechar las ventajas que presenta. Este proceso se puede aplicar en todas las posiciones y en piezas tan delgadas como 1,6 mm (1/16”) de espesor, aunque el intervalo de espesores varía de acuerdo con el sistema de protección, auto protector y protección externa con CO₂, ya que con la atmósfera de CO₂, la penetración es consideradamente mayor y por tal motivo espesores entre 1/16” y 1/2”, se pueden soldar con CO₂ sin la preparación de la junta. También se pueden emplear arcos con transferencia globular y en corto circuito, los cuales son aconsejables para secciones delgadas, debido a la poca penetración causada por las bajas densidades de corriente, a las cuales se producen dichos arcos. Sin embargo los electrodos de varilla

tubular se pueden utilizar con transferencia globular, con altas densidades de corriente y protección gaseosa, para mayor penetración y velocidad de deposición (18, 27, 34).

La base fundamental de los electrodos tubulares es el fundente que contienen en su interior, el cual se encarga de proporcionar los elementos necesarios para proporcionar las propiedades mecánicas o metalúrgicas para cada aplicación, incluyendo los elementos de aleación, ya que el exterior de los electrodos suele ser de acero de bajo carbono. También incorpora los productos para afinado, desoxidación, desnitrificación y protección de la soldadura así como para la estabilización del arco. El fundente contiene polvo metálico, además de elementos de aleación, para mejorar el rendimiento gravimétrico del hilo. Los alambres se clasifican en básicos o rutilos, según la naturaleza del fundente de relleno. En los alambres auto protegidos, además se añade celulosa o carbonatos para generar su propia atmósfera protectora. La composición del fundente influye en las características del arco y la soldabilidad. Pueden incrementar la penetración, ayudar a limpiar los contaminantes superficiales del metal, influir en la velocidad de soldadura y afectar en las propiedades metálicas de la unión. Los fundentes son los mismos que se utilizan en el proceso de soldadura por arco sumergido (SAW).

Existen los mismos tipos de transferencia que en la soldadura con alambre macizo (GMAW), sin embargo, en la soldadura con alambre tubular (FCAW), la transferencia normalmente empleada produce salpicaduras. Los diámetros pequeños (inferiores a 1,6 mm) con mezclas de argón como gas de protección, pueden soldarse con los tres tipos de transferencia; arco corto, globular y spray (realmente no se produce el afilado del extremo del alambre como con alambre macizo) y la mayoría de ellos se pueden utilizar en todas las posiciones. Los diámetros superiores sueldan con transferencia con arco globular o cercano al spray cuando se utilizan con mezclas de argón y sólo con arco globular cuando se utilizan con CO₂. Como gases de protección se emplean generalmente dióxido de carbono o mezclas de argón con un 5 % al 25 % de dióxido de carbono. La mezcla de argón con CO₂, proporciona una reducción de humos, mejores características de transferencia de metal, soldadura con mayor resistencia y límite elástico que las realizadas con sólo CO₂, siendo

también mejor la estabilidad del arco y su soldabilidad, aproximándose la transferencia al tipo arco largo, además se puede controlar mejor el baño de fusión. El dióxido de carbono se utiliza con la mayoría de alambres tubulares en diámetros mayores a 1,6 mm, que generalmente se emplean en espesores gruesos y sobre superficies con suciedad y óxidos.

4.3.1. Fuentes de potencia

La corriente directa es suministrada por un transformador – rectificador o un generador, donde el electrodo se conecta al polo positivo. La corriente directa con electrodo negativo casi no se utiliza, al igual que la corriente alterna. El suministro de potencia con corriente constante y voltaje constante son utilizados en este proceso de soldadura. Las pistolas de la soldadura por arco con varilla tubular FCAW, son muy similares a las utilizadas en el proceso MIG. La misma pistola del proceso MIG se puede utilizar en el proceso FCAW de autoprotección o con gas de protección auxiliar, usando o no las conexiones de gas, sin embargo se hacen pistolas especiales de varios tamaños para la soldadura por el proceso de autoprotección. La única diferencia es que se usan fuentes de potencia de corriente más grandes y pistolas o sopletes de soldadura más robustos. Cuando se emplea la versión carente de gas, se elimina el sistema de suministro de gas de protección, por lo cual se descartan los cilindros de gas, válvulas, reguladores y medidor de flujo.

Como con todo proceso de soldadura de arco eléctrico, el FCAW tiene sus características particulares y no es correcto decir que exista un proceso de soldadura mejor que otro, pues cada uno tiene sus ventajas y sus limitaciones. La selección de un proceso o combinación de procesos de soldadura para una aplicación particular depende de varios factores como la disponibilidad de corriente eléctrica, la disponibilidad del material de aporte, la cantidad de metal de soldadura a depositar, las condiciones locativas (aplicaciones a nivel del piso o en altura) y ambientales (Condiciones secas o húmedas, corrientes de aire, vientos fuertes, etc.), tiempo disponible para la culminación de la obra y disponibilidad de personal de soldadura para el proceso en consideración. En la tabla 4.3 se presentan algunas ventajas y limitaciones del proceso FCAW.

Tabla 4.3. Ventajas y limitaciones del proceso FCAW (34)

Ventajas	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> * Se pueden soldar casi todos los aceros y en amplio rango de espesores. * El electrodo es continuo y no se pierde tiempo en cambiar los electrodos consumidos (SMAW). * Menor costo y distorsión de las soldaduras comparadas con el proceso SMAW * Se produce menos escoria y cordones con mejores propiedades que en el proceso SMAW. * Se puede automatizar fácilmente y tiene alta velocidad de deposición. * Este proceso es más flexible y adaptable que el proceso SAW. * Permite soldar en todas las posiciones y tiene alta tolerancia a los contaminantes que producen grietas. * Excelente apariencia de las soldaduras (lisas y uniformes) * Las condiciones ambientales de viento no le afectan tanto como al proceso de soldadura GMAW. * Menos salpicaduras y sensibilidad a la porosidad, además menor riesgo de defectos de fusión que en el proceso GMAW. <p>En muchas aplicaciones es más productiva que el proceso GMAW a pesar del mayor costo del alambre tubular.</p>	<ul style="list-style-type: none"> * Se debe retirar la escoria * Desprende una gran cantidad de humos * Actualmente está limitado a aleaciones ferrosas y base níquel. * Los alambres tubulares tienen un precio más elevado que los macizos, excepto para ciertos aceros de alta aleación. * Los equipos son más costosos y complejos que los utilizados en el proceso SMAW, además su portabilidad es limitada. * La fuente de poder y el alimentador de alambre deben estar relativamente cerca del lugar donde se realiza el cordón de soldadura. * Para la modalidad FCAW-G, la protección puede ser afectada por corrientes de aire. * Se puede producir más humos que en el proceso GMAW y SAW.

4.4. Soldadura por arco con electrodo de tungsteno y gas de protección (GTAW)

La soldadura GTAW (*gas tungsten arc welding*), o soldadura TIG (*tungsten inert gas*), es un proceso en el que se usa un electrodo no consumible de tungsteno sólido y donde el electrodo, el arco y el área alrededor de la soldadura fundida, son protegidas de la atmósfera, por un escudo de gas o mezclas de gases inertes. Si algún metal de aporte es necesario, este es agregado a la soldadura por el frente de avance de la soldadura que se está formando. Este proceso es generalmente manual, pero puede ser automatizado

completamente. Cuando se agrega material de aporte se requiere la utilización de las dos manos, una característica sobresaliente es la limpieza que se obtiene en los depósitos de soldadura, produciendo cordones libres de grietas en aleaciones difíciles de soldar por otros procesos (18, 34, 35). Con este proceso se consiguen soldaduras de alta calidad y con una elevada pureza metalúrgica, exentas de defectos y buen acabado superficial, por ello es muy utilizado para soldaduras de responsabilidad en la industria del petróleo, química, petroquímica, alimentación, generación de energía, nuclear y aeroespacial.

La soldadura TIG fue desarrollada inicialmente con el propósito de soldar metales anticorrosivos y otros metales difíciles de soldar, no obstante, al pasar del tiempo, su aplicación se ha expandido, incluyendo todos los metales usados industrialmente, incluyendo las aleaciones de aluminio, acero inoxidable, aleaciones de magnesio, Níquel y las aleaciones con base de níquel, cobre, cobre - silicio, cobre - níquel, plata, bronce fosfórico, aleaciones de hierro de alto carbono y bajo carbono, hierro colado y otros. En este proceso es imposible que ocurra una corrosión debido a restos de fundente atrapados en la soldadura y el proceso entero se ejecuta sin salpicaduras o chisporroteo. Además, el proceso es ampliamente conocido por su versatilidad para soldar materiales no similares y aplicar capas de endurecimiento de diferentes materiales al acero, aunque el plomo y el zinc son difíciles de soldar debido a la vaporización de estos metales, por su bajo punto de fusión, pero los aceros y otros materiales con alto punto de fusión, que están recubiertos con plomo, estaño, cadmio, aluminio o zinc, se pueden soldar con procedimientos especiales (18, 34). En la figura 4.11, se observa un esquema del proceso de soldadura GTAW.

En cualquier proceso de soldadura, el mejor cordón, que se puede obtener, es aquel donde la soldadura y el metal base comparten las mismas propiedades químicas, metalúrgicas y físicas. Para lograr esas condiciones, la soldadura fundida debe estar protegida de la atmósfera durante la operación de la soldadura, de otra forma, el oxígeno y el nitrógeno de la atmósfera se combinaría con el metal fundido, dando como resultado un cordón débil y con porosidad. En la soldadura TIG, la zona de soldadura es protegida del medio ambiente

por un gas inerte, que es alimentado a través de la antorcha, quedando aislada el 100 % de la zona de soldadura y como se tiene un control muy preciso de la aplicación de calor, las soldaduras TIG, son más fuertes, dúctiles y más resistentes a la corrosión, que las soldaduras hechas con el proceso de electrodo recubierto. Además, como no se necesita ningún fundente, este tipo de soldaduras es aplicable a una amplia gama de procedimientos de unión de metales (18, 34, 39). El proceso de soldadura GTAW se puede realizar en todas las posiciones y es especialmente usada para soldar metales delgados (0,13 mm o 0,005 in), pero su tasa de deposición es baja y no resulta económico para soldar materiales con espesores mayores de 6 mm, en estos casos el soldeo TIG se utiliza para efectuar el pase de raíz, empleándose otros procesos de mayor productividad para el resto de las pasadas de relleno; aunque en ciertos casos, donde se necesita soldadura de alta calidad en secciones gruesas, se puede aplicar con múltiples pasadas (18).

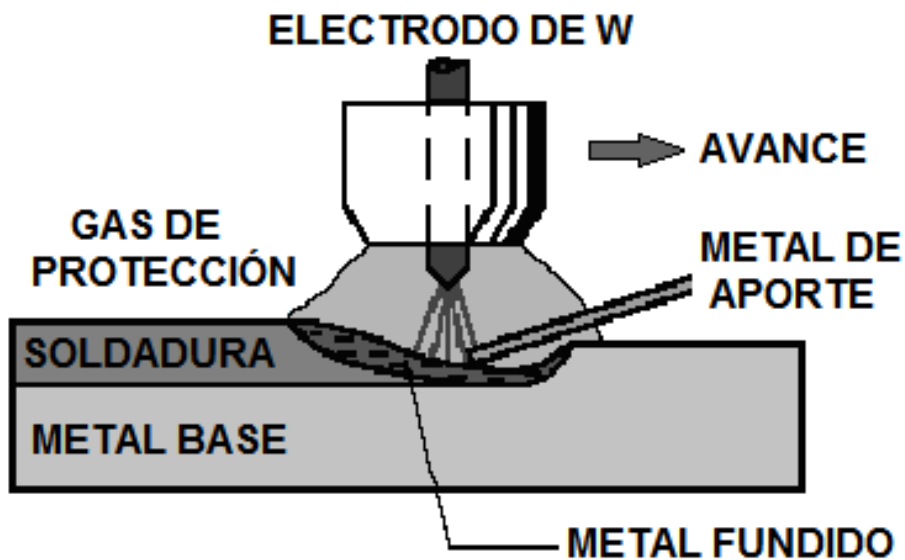
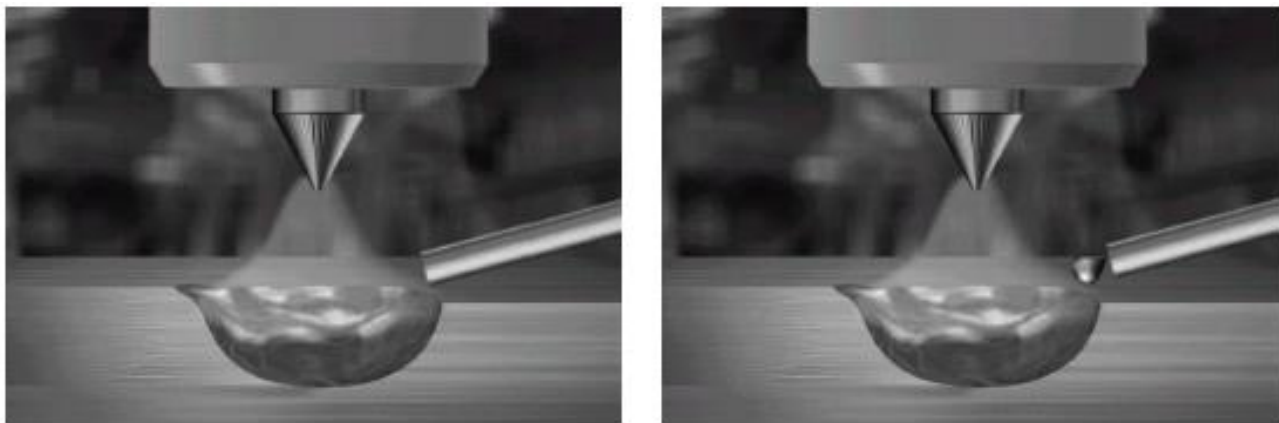


Figura 4.11. Esquema de la soldadura por arco eléctrico con electrodo de tungsteno y gas de protección (3, 18)

La fuente de potencia para TIG puede utilizarse con corriente directa DC como con corriente alterna AC, cuya elección de la clase de corriente y polaridad dependerá del material a soldar, ya que cada tipo de corriente tiene características sobresalientes que hacen que se adapte mejor a ciertas aplicaciones específicas. La corriente directa con

electrodo negativo (Polaridad directa), es el tipo de corriente más utilizado, ya que produce soldaduras satisfactorias en la mayoría de los metales y aleaciones, produciendo un cordón profundo y estrecho, con mayor penetración, al producido con corriente directa y electrodo positivo (Polaridad inversa), o con corriente alterna, sin embargo, hay que tener cuidado cuando se soldan piezas delgadas, por la gran penetración de este proceso. La corriente directa con electrodo positivo produce un cordón más plano y ancho con muy poca penetración y se utiliza con menor frecuencia. Con el fin de realizar una mejor elección del tipo de corriente, se van a destacar algunos aspectos diferenciales de ambas alternativas. En la figura 4.12 se observa cómo se transfiere el metal de aporte al metal base.



a) Inicio del arco

b) Inicio de la fusión del metal de aporte

Figura 4.12. Transferencia del metal en el proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo de tungsteno y gas de protección (8, 18)

Arco con corriente continua: Cuando se utiliza la polaridad directa, la energía del arco se concentra fundamentalmente en la pieza, por lo que se obtiene un rendimiento térmico relativamente aceptable, una velocidad de soldeo más rápida y una buena penetración, ya que el balance de calor es 70 % en la pieza de trabajo y 30 % en el electrodo. Por otra parte, el electrodo soporta intensidades hasta 8 veces mayores que si estuviese conectado al polo positivo, sin fundirse, ni deteriorarse. Si se utiliza la polaridad invertida, el reparto térmico es menos favorable (70 % en el electrodo y 30 % en la pieza de trabajo), lo que se traduce en un baño relativamente ancho, con poca penetración y una excesiva acumulación de calor

en el electrodo, que provoca su calentamiento y rápido deterioro, incluso a bajas intensidades de corriente. De acuerdo con esto, se recomendada la polaridad directa. No obstante, en el caso de soldar aleaciones ligeras de aluminio o manganeso, no es posible soldar con polaridad directa y se utiliza la polaridad inversa, ya que esta polaridad tiene una acción limpiadora de óxidos. Estos materiales forman una capa de óxidos refractarios que recubren el baño e imposibilitan su soldadura con polaridad directa. En cambio, con polaridad inversa se produce la vaporización de los óxidos y la rotura de los mismos, que flotan y se desplazan a los bordes del baño de fusión facilitando una acción limpiadora continuidad en el charco de soldadura.

Arco con corriente alterna: La corriente alterna tiene ventajas intermedias de las dos polaridades: el buen comportamiento durante el semi ciclo de polaridad directa y el efecto decapante del baño durante el semi ciclo de polaridad inversa, por lo cual la corriente alterna tiene una buena penetración y reduce el óxido en la superficie, con un balance de calor del 50 % en la pieza de trabajo y 50 % en el electrodo. Como principales inconvenientes presenta dificultades de cebado y la estabilidad del arco, el arco se apaga cada vez que el voltaje es nulo, dos veces cada ciclo, lo que obliga a mejorar la estabilidad de la tensión de vacío, con lo cual se debe incrementar, incorporando al equipo un generador de alta frecuencia, la cual puede ser aplicada continuamente, o cada vez que la corriente de soldeo pase por cero (la selección se realiza desde el panel de control). El cordón que se obtiene, cuando se agrega material de aporte, es similar al depósito con electrodo recubierto pero con menos penetración, este cordón con corriente alterna es más ancho y menos profundo que el producido con corriente directa con electrodo negativo, pero tiene mayor penetración que el obtenido por corriente directa y electrodo positivo. Cuando se suelda con polaridad inversa, no se debe hacer con alta intensidad, puesto que la punta del electrodo se fundirá, debido a que se logran alcanzar temperaturas superiores a los 4200 °C y el punto de fusión del tungsteno es de 3800 °C. Con polaridad directa sí es posible mantener el electrodo con la punta afilada (mejora la estabilidad del arco), ya que la temperatura no supera los 3600 °C en la punta del electrodo, pudiéndose soldar así con mayor intensidad. Por ejemplo, con un electrodo de tungsteno de 2.5 mm de diámetro se

puede soldar hasta con 200 A con polaridad directa. Sin embargo con polaridad inversa, un electrodo de tungsteno de 6 mm de diámetro no puede emplearse con más de 120 A, porque la punta del electrodo se fundiría. En la figura 4.13, se observa un esquema de la polaridad y la penetración en el proceso de soldadura GTAW. La velocidad de soldeo afecta tanto al ancho del cordón, como la penetración, siendo su efecto más importante el primero. Ya que para dos cordones de soldadura en los cuales el único parámetro que se varía es la velocidad de soldeo, veremos como el cordón que se ejecuta a mayor velocidad se disminuirá considerablemente su ancho y la penetración. La velocidad de soldeo es un parámetro muy importante, el cual siempre se intenta que sea el mínimo posible para elevar el rendimiento económico, y ser mucho más productivos. Sin embargo, en muchos otros casos, la velocidad de soldadura deberá adaptarse a los requisitos de calidad necesarios.

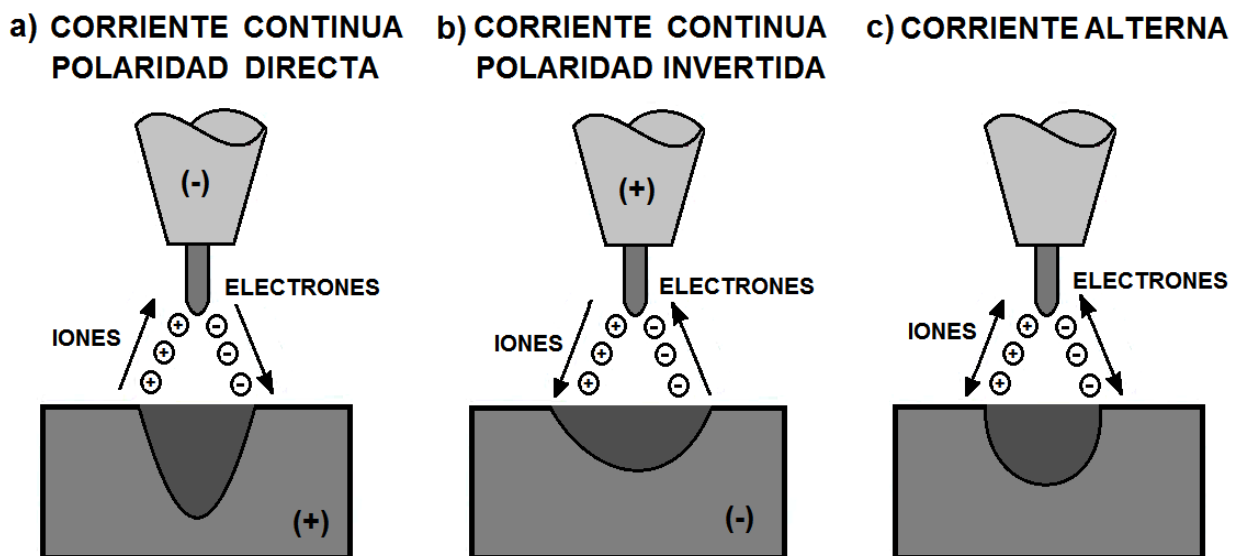


Figura 4.13. Esquema de la polaridad y la penetración en el proceso de soldadura GTAW

4.4.1. Fuente de potencia y accesorios

El equipo básico para el proceso TIG comprende la fuente de potencia, con control de pie si es posible, suministro de gas con controles, cables de soldadura, pinza de masa con su cable, mangueras, electrodo de tungsteno, antorcha para soldar y alambre de aporte si se requiere. La antorcha es generalmente refrigerada con agua para altos amperajes, pero para

bajas corrientes puede ser refrigerada por aire. La fuente de energía para este proceso debe presentar una característica descendente (intensidad de corriente constante), para que la corriente de soldeo se vea poco afectada por las variaciones en la longitud del arco, además la fuente debe tener un amplio rango de intensidades, ya que requiere de intensidades bajas hasta de 5 A y debe ser capaz de suministrar altas intensidades de acuerdo con el material y el espesor que se va a soldar. Debido a que en el proceso TIG podemos soldar con corriente continua y alterna, podemos encontrar estos dos tipos de fuente dependiendo del tipo de corriente. En los equipos con corriente continua pueden tener una función pulsatoria, para los casos que se quiera obtener un mayor control del aporte térmico al metal base; este es conocido como TIG con arco pulsado. Mediante este proceso conseguimos una buena penetración con bajo aporte térmico, menor distorsión, una zona afectada térmicamente más pequeña, es más fácil de soldar espesores delgados y se tiene mejor control del baño de fusión para la aplicación de soldaduras en posiciones difíciles, mejorando la calidad de soldadura. El proceso de soldadura TIG por arco pulsado puede aplicarse manual o automáticamente, y puede realizarse con o sin material de aportación. La intensidad de fondo suele ser de 15 A a 30 A de intensidad, mientras que la intensidad de pico depende del material a soldar, penetración deseada y de la duración del pulso. En general se puede decir que la corriente de pico será entre un 40 % a 60 % más alta que la corriente en el soldeo no pulsado.

Pistola o antorcha

La pistola o antorcha tienen la misión de conducir la corriente y el gas de protección hasta el lugar donde se realiza el cordón de soldadura. Pueden ser de refrigeración natural (por aire) o de refrigeración forzada (mediante la circulación de agua). Los primeros se emplean en el soldeo de espesores finos, que no requieren grandes intensidades de corriente y las antorchas de refrigeración forzada se recomiendan para trabajos que exijan intensidades superiores a los 150 A. En estos casos la circulación de agua por el interior de la pistola evita el sobrecalentamiento de la boquilla y de la misma pistola. El electrodo de tungsteno es el que transporta la corriente hasta la zona de soldeo, se sujeta rígidamente mediante una

pinza alojada en el cuerpo de la antorcha. Cada antorcha dispone de un juego de pinzas de distintos tamaños para la correcta sujeción de los diferentes diámetros de los electrodos. Es muy importante que exista un buen contacto eléctrico entre electrodo y pinza. El gas de protección llega hasta la zona de soldeo a través de una tobera de material cerámico, sujeta en la cabeza de la antorcha. Esta tobera tiene la misión de dirigir y distribuir el gas protector sobre la zona de soldeo. Cada antorcha va equipada con un juego de toberas para las distintas exigencias de consumo de gas protector. La mayoría de las boquillas llevan alojadas en su interior una lente de conducción de gas, que está formada por una malla de acero inoxidable con diminutos agujeros concéntricos que sirven para enfocar el gas protector, produciendo un flujo estable y que reduce la turbulencia y asegura una protección más efectiva. En la figura 4.14, se observa el esquema del proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo de tungsteno y gas de protección.

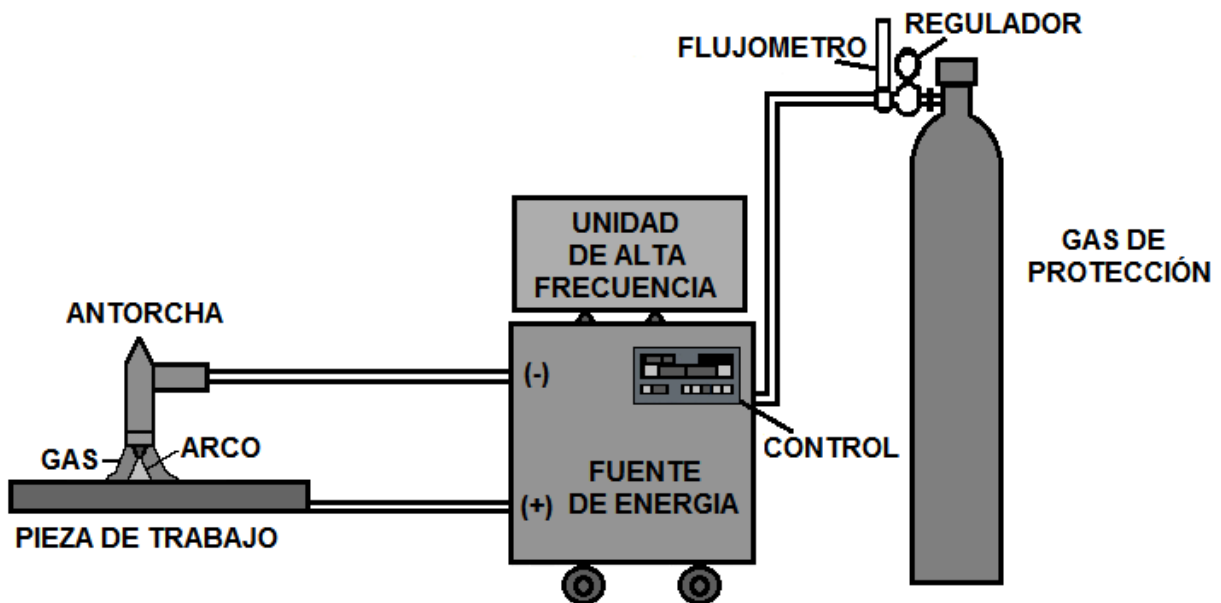


Figura 4.14. Esquema del proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo de tungsteno y gas de protección

4.4.2. Electrodo

Los electrodos utilizados en el proceso TIG no son consumidos por el cordón de soldadura, pero sí se desgastan con el trabajo; la misión del electrodo en este proceso es mantener el

arco sin aportar material al baño de fusión. Por este motivo y para evitar su desgaste, es muy importante que posea un elevado punto de fusión. Esta es la razón por la que cuando se suelda con corriente continua, el electrodo se suele conectar al polo negativo, ya que el calor generado es menor que en positivo. Estos electrodos son de tungsteno puro (99,5 %); de tungsteno aleado con thorio o zirconio. Los electrodos de tungsteno pueden ser afilados de manera total o parcial para mejorar la concentración del arco. Los electrodos de tungsteno con thorio o zirconio mantienen sus extremos afilados a alta temperatura por mayor tiempo que el tungsteno puro. El diámetro del electrodo es muy importante ya que determina la intensidad de soldeo del proceso. Si empleamos una intensidad baja para un diámetro de electrodo dado se producirá inestabilidad del arco. Si por el contrario utilizamos una intensidad excesiva podremos originar erosión y fusión de la punta del electrodo, así como inclusiones de tungsteno en el metal soldado. Con corriente directa los electrodos tienen su máxima capacidad de conducción de corriente. Con corriente inversa sólo se puede conducir un 10 %, de la cantidad que podría conducir en las condiciones anteriores, mientras que en caso de utilizar corriente alterna podríamos obtener un 50 % de la capacidad máxima de conducción de corriente. Es muy importante usar un diámetro interior de la tobera adecuado para cada diámetro de electrodo, ya que de ello dependerá la correcta protección del gas inerte.

4.4.3. Gases de protección

Los gases más aconsejables para utilizar en el proceso TIG son argón, helio, mezclas de argón y helio, argón y nitrógeno. Dependiendo de las aplicaciones, el argón, el helio o mezclas de argón y helio son usados ya que no reaccionan con el electrodo o con el metal de soldadura. Se prefiere más el argón porque da un arco más suave, uniforme y estable. Además tiene una gran versatilidad y es aplicado de forma exitosa en una gran variedad de metales y aleaciones, también por su alto rendimiento, permitiendo soldaduras con un bajo flujo para ejecutar el proceso. El Helio genera un arco más caliente, permitiendo una elevación del voltaje en el arco del 50 % - 60 %. Este calor extra es útil cuando la soldadura es aplicada en secciones muy gruesas, ya que se tiene un metal más caliente y fluido,

además el helio es menos eficiente en la limpieza del óxido superficial en los metales no ferrosos, por ser más liviano que el aire. La mezcla de estos dos gases se usa para aprovechar los beneficios de ambos, pero la selección del gas o mezcla de gases dependerá de los materiales a soldar.

4.4.4. Metal de aporte

El metal de aportación en el soldeo TIG no es siempre necesario cuando se sueldan piezas delgadas (de menos de 3 mm de espesor) utilizando una preparación de bordes recta o con bordes levantados. En el caso que sea necesario utilizar el material de aportación, es muy importante que este se mantenga libre de contaminaciones ya sea en forma de humedad, polvo o suciedad. Puesto que el proceso de soldadura TIG es un proceso que no produce escorias y que se realiza en una atmósfera inerte que no provoca reacciones en el baño, el material de aportación deberá tener una composición química similar a la del material base. El material de aporte en forma de varilla o alambre se agrega manual o automáticamente durante el proceso de soldadura o se agrega como insertos consumibles antes de iniciar el arco, las adiciones manuales de metal se hacen por medio de barras de metal de aporte, que se dirigen hacia el baño de metal fundido. La alimentación automática consiste en suministrar metal de aporte, normalmente en alambre enrollado en bobinas, el cual llega al baño metálico a una velocidad predeterminada; el alambre o alambres pueden ser calentados eléctricamente para una mayor velocidad de deposición. Durante el proceso de soldeo es muy importante que la parte caliente de la varilla esté lo suficientemente cerca del baño de fusión para que lo cubra el gas protector. En la tabla 4.4 se presentan algunas ventajas y limitaciones del proceso GTAW.

4.5. Proceso de soldadura por arco sumergido (SAW)

En el proceso de soldadura por arco sumergido "SAW" el arco es creado entre la pieza a soldar y la punta del electrodo consumible, el cual está cubierto por una capa de fundente granulado, que fue previamente servido. El arco está escondido debajo de la capa de

fundente granulado, en el cual, una parte del fundente se convierte en escoria protectora sobre el cordón de soldadura fundido y la parte remanente puede ser recuperada para ser utilizada nuevamente. El fundente protege el baño de fusión de la atmosfera circundante durante el proceso y tiene un papel similar al del recubrimiento de los electrodos revestidos que es proteger el arco, estabilizarlo, generar una escoria de viscosidad y tensión superficial adecuadas e incluso permite añadir elementos de aleación o compensar la pérdida de ellos (18, 34).

Tabla 4.4. Ventajas y limitaciones del proceso GTAW (34)

Ventajas	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> * Se pueden soldar casi todos los metales. * El arco es estable y concentrado. * No produce escoria, ni humos. * No se produce chisporroteo o proyecciones. * Produce soldaduras lisas y regulares de alta calidad. * Se puede utilizar con o sin metal de aporte en todas las posiciones. * Se puede automatizar. * Alta velocidad de soldeo para espesores delgados menores a 4 mm. * Permite un buen control de la penetración en el pase de raíz. 	<ul style="list-style-type: none"> * Es afectada por corrientes de aire. * No es económica para espesores mayores a 10 mm. * En la aplicación manual, el soldador tiene que tener gran habilidad. * Produce mayor radiación ultravioleta que en otros procesos, lo que requiere de una protección adecuada. * El control de la fuente de energía y el metal de aporte son independientes.

El proceso por arco sumergido es principalmente realizado con equipos totalmente automáticos, aunque se puede usar como proceso semiautomático mediante pistolas de mano, similar al proceso GMAW, pero con diámetros de alambre mayores (hasta 2,4 mm) y a cambio del gas de protección se aporta fundente. Para incrementar la productividad se puede implementar un arreglo con varios electrodos o multi-alambres. Por su alto poder de deposición de metal de aporte, permite obtener grandes rendimientos en producción (hasta 50 kg/h) a bajo costo, para una amplia gama de aplicaciones y es particularmente conveniente para las soldaduras rectas de gran longitud, con excelente calidad en posición

plana, siendo muy usado en la fabricación de grandes tanques para plantas químicas, pesadas estructuras y en la industria de fabricación y reparación de barcos.

Este proceso es bastante versátil, de alta calidad y se utiliza en aceros al carbono, de baja aleación, de alto contenido en carbono, aleados, inoxidable y aleaciones de níquel. También se emplea para revestir o recargar materiales (*overlay*) con objeto de resistir fenómenos de corrosión y desgaste. Los alambres se suministran en forma de alambre sólido, alambre tubular con fundente en su interior y en forma de fleje o banda, especiales para depósitos por recargue. Estos alambres se presentan enrollados en carretes de 10 kg a 500 kg o en bidones de 100 kg a 1000 kg, mientras que el fleje se subministra en bobinas. El diámetro del alambre varía desde 1,6 mm a 6,4 mm y la gama de intensidades de 150 A a 1600 A. Los alambres de acero se recubren con cobre para evitar la corrosión y mejorar el contacto eléctrico, además disminuye el rozamiento del hilo con el dispositivo de alimentación. En la figura 4.15 se observa un esquema del proceso SAW.

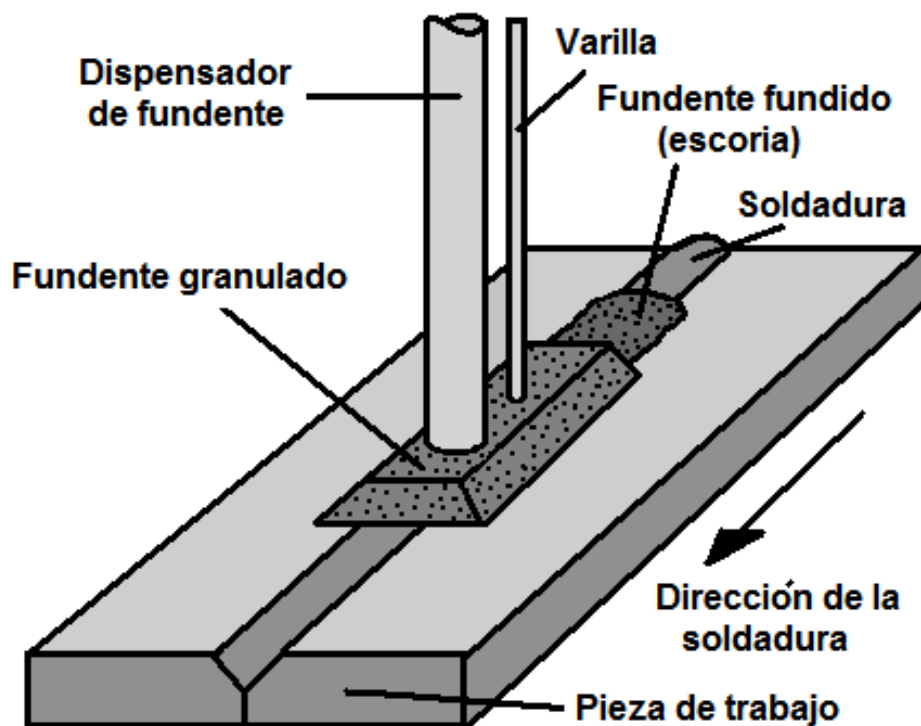


Figura 4.15. Esquema del proceso de soldadura por arco sumergido (8, 18)

4.5.1. Fuente de potencia

El equipo básico comprende una fuente de potencia, un mecanismo de alimentación de alambre, controles, cables, antorcha de soldadura, mecanismo alimentador de fundente y la pinza de masa con su cable. En soldadura automática se necesita un mecanismo de avance que mueva la antorcha o la pieza y normalmente se tiene un mecanismo de recuperación del fundente que sobra para ser reciclado. Las fuentes de potencia pueden ser fuentes de corriente continua de tensión constante, fuentes de corriente continua de intensidad constante o fuentes de corriente alterna. Las más utilizadas son de corriente continua de tensión constante. El panel de control permite la regulación de la velocidad de alimentación del hilo (control de la intensidad), el control de la tensión y el paro y arranque del proceso. El cabezal está formado por el sistema de alimentación del alambre, pistola de soldeo con su tubo de contacto, tolva de fundente y mangueras de conducción y sistema de montaje y posicionamiento del cabezal. El equipo también debe contar con otros accesorios como un sistema de desplazamiento, sistema de recuperación de fundente, posicionadores y accesorios de sujeción y sistema de seguimiento del cordón de soldadura. Una vez arreglados y cuadrados los parámetros, se puede ejecutar soldaduras de alta calidad con una alta velocidad de producción. La corriente directa y la corriente alterna producen buenos resultados en la soldadura por arco sumergido. La corriente directa da un mayor control de la forma del cordón, la penetración y velocidad de avance en la soldadura, además el inicio del arco es más fácil. La mejor forma del cordón se obtiene con corriente directa y electrodo positivo, la cual también produce la máxima penetración. Con corriente directa y electrodo negativo se obtiene mayores velocidades de deposición y mínima penetración. La corriente alterna minimiza el soplo del arco y produce una penetración intermedia entre corriente directa con electrodo positivo y corriente directa con electrodo negativo. Para una buena estabilidad, se necesita una mayor densidad de corriente para corriente alterna que para corriente directa, las condiciones de inestabilidad del arco, en general, se pueden corregir aumentando la corriente o reduciendo el tamaño del arco. En la tabla 4.5 se presentan algunas ventajas y limitaciones del proceso SAW.

Tabla 4.5. Ventajas y limitaciones del proceso SAW (34)

Ventajas	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> * Se pueden soldar casi todos los metales. * Poco afectada por corrientes de vientos. * Bajo costo de preparación de bordes * Tiene alta penetración, permitiendo soldar en un solo pase materiales de 1". * Es muy confiable si los parámetros de operación son los correctos. * Muy poca tensión transversal. * No produce salpicaduras y la soldadura es suave y limpia. * Muy bajo riesgo de grietas por hidrógeno. * Gran flexibilidad en la obtención de las propiedades de la soldadura. * Alta velocidad de deposición y de soldadura. * Procesos automáticos, con bajo nivel de humos comparados con otros procesos. 	<ul style="list-style-type: none"> * Los equipos son muy costosos. * La instalación puede ser compleja, debido al tamaño de las estructuras metálicas. * El arco está oculto, por lo cual oculta la trayectoria que debe seguir. * La soldadura está limitada a posiciones transversal, horizontal, vertical, orbital, y a veces hasta diagonalmente. * Es necesario un dispositivo para el almacenamiento, alimentación y recolección del fundente. * Muchas juntas requieren de anillos de respaldo * El fundente se puede contaminar y producir discontinuidades en la soldadura.

4.6. Soldadura oxiacetilénica (OAW)

El proceso de soldadura oxiacetilénica o *oxy-acetilene welding* (OAW), utiliza una llama intensa que es producida por la combustión controlada de una mezcla de gas comburente (oxígeno), con un gas combustible (acetileno). Los gases son obtenidos de tanques de almacenamiento separados, que pasan a través de reguladores y luego a través de la antorcha en donde se mezclan, para salir por la cabeza de antorcha o boquilla donde ocurre la ignición. Este proceso utiliza la energía calorífica generada por la reacción química del acetileno y el oxígeno. Esta reacción es fuertemente exotérmica y forma una llama que se dirige mediante el soplete a la pieza a unir, provocando su fusión y soldadura. Este proceso de soldeo, permite obtener una unión metalúrgica adecuada con relativa facilidad y una homogeneidad de propiedades satisfactoria; y al mismo tiempo como consecuencia de la

aportación de calor puede provocar cambios metalúrgicos del material y segregaciones durante el enfriamiento, además de distorsiones y tensiones internas, entre otros cambios.

En el soldeo oxi-acetilénico, el soldador tiene un considerable control de la temperatura del baño de fusión, a través de la velocidad de avance y la velocidad de deposición del metal de aportación, ya que las fuentes de calor y de metal de aportación son independientes (se utilizan varillas metálicas como metal de aportación), lo que permite al soldador aplicar el calor de la llama de forma preferente, bien sobre el metal base o bien sobre el metal de aportación. En cuanto a la protección del baño de fusión la realizan los propios gases de la llama, aunque en algún caso es necesario recurrir al empleo de fundentes desoxidantes. Por este proceso se pueden soldar la mayoría de los metales y aleaciones férreas y no férreas con la excepción de los metales refractarios como Nb, Ta, Mo y W y de los activos como Ti, Zr. Los cordones de soldadura son formados por el metal fundido del metal base y el material de aporte (si se utiliza), que se forman con el contacto de la llama. El uso de fundentes remueve los óxidos y las impurezas del área de soldadura y ayuda a asegurar una soldadura de buena calidad. Exceptuando el plomo, zinc y algunos metales preciosos, la soldadura por este método requiere de fundente. En la figura 4.16, se observa un esquema del proceso de soldadura oxiacetilénica.

El oxígeno es el gas que se utiliza como comburente puesto que facilita e intensifica la combustión de los gases combustibles al mezclarse con ellos. Su utilización como gas comburente en vez de aire se debe a que el oxígeno alcanza mayores temperaturas de combustión. En función del gas combustible empleado, el oxígeno proporciona de 800 °C a 1000 °C más que el aire de la atmósfera, puesto que el nitrógeno presente en el aire (78 %) disminuye la temperatura. El acetileno (C_2H_2) es el hidrocarburo más utilizado en este tipo de soldadura. Es un gas incoloro, de olor característico, que se obtiene por reacción química del carburo de calcio y del agua; en donde el precipitado es cal apagada y los gases acetileno. El acetileno es un gas que no se puede comprimir a presiones elevadas por peligro de explosión. Por este motivo, para poder embotellar sin peligro mayores cantidades, los cilindros de acetileno llevan en su interior una masa porosa embebida en

acetona que tiene la propiedad de disolver fácilmente gran cantidad de este gas a presiones bajas de 1,7 MPa (34).

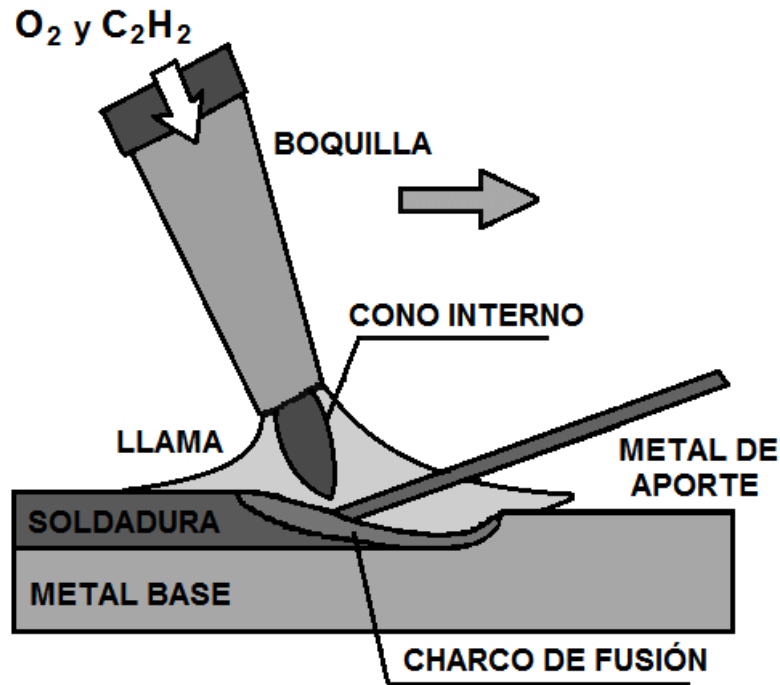


Figura 4.16. Esquema del proceso de soldadura oxiacetilénica (8, 18)

La llama oxiacetilénica es fácilmente regulable, en el sentido de que permite obtener llamas estables con diferentes proporciones de oxígeno y acetilénico. La intensidad de la llama depende del flujo de los gases, la proporción de la mezcla y las propiedades del gas combustible seleccionado, así como del tipo de boquilla. El flujo de los gases y la proporción de la mezcla son controlados por reguladores de presión y las válvulas ubicadas en la antorcha y a la salida de los cilindros de gas. En los sopletes o antorchas de soldadura autógena se pueden obtener tres tipos de llama, las que son reductoras o carburantes, la neutra y la oxidante. De los tres tipos de llamas, la neutra es la de mayor aplicación. Esta llama está balanceada en la cantidad de acetileno y oxígeno que utiliza. La temperatura que se puede alcanzar después de la punta del cono luminoso es de 3250 °C (zona de trabajo), en el cono envolvente alcanza 2100 °C y en la punta extrema llega a 1275 °C. Este es un proceso manual, aunque en algunos casos se puede automatizar. En ciertas ocasiones la soldadura oxiacetilénica se utiliza aire como comburente, lo que produce que la

temperatura de esta llama sea menor en un 20 % que la que usa oxígeno, por lo que su uso es limitado sólo a la unión de algunos metales como el plomo (18, 34).

El cono o dardo es la señal más característica de la llama, es de color blanco deslumbrante y su contorno está claramente delimitado. Es donde se produce la combustión primaria del acetileno con el oxígeno. Delante del cono se encuentra la zona más importante de toda la llama, la cual no puede reconocerse ópticamente, es la llamada zona de soldeo o zona de trabajo. A la hora de realizar el soldeo se debe dejar entre la punta del cono y la superficie del baño de fusión una distancia que varía entre 2 mm y 5 mm dependiendo del tamaño de la llama y del soplete. El penacho es donde se produce la combustión con el oxígeno del aire, de todos los productos que no se han quemado anteriormente. De esta forma se impide que el oxígeno del aire entre en contacto con los metales a unir, constituyendo una capa protectora que evita que se produzca su oxidación. Con llama reductora o carburante hay un exceso de acetileno, lo que genera que entre el cono luminoso y el envolvente exista un cono color blanco, cuya longitud está definida por el exceso de acetileno. Esta llama se utiliza para la soldadura de níquel, ciertas aleaciones de acero y muchos de los materiales no ferrosos. La llama oxidante tiene la misma apariencia que la neutral, excepto que el cono luminoso es más corto y el cono envolvente tiene más color. Esta llama se utiliza para la soldadura del latón y el bronce (Ver figura 4.17).

Generalmente se utilizan varillas de aportación de la misma composición que el material base que se está soldando. El diámetro de las varillas suele oscilar entre 1,6 mm y 6,4 mm y su longitud entre 600 mm y 900 mm. En el acero al carbono no es necesario el empleo de fundentes ya que los óxidos formados se funden con facilidad, sin embargo, en el soldeo de aceros inoxidable y aluminios es imprescindible utilizar fundentes para disolver los óxidos y proteger el metal de soldadura. No obstante, el empleo de un fundente no sustituye a la limpieza previa de la pieza que se va a soldar. Los residuos que resultan de la operación de soldeo de aceros inoxidable suelen ser corrosivos, por lo que se exige una perfecta eliminación de los mismos. Los fundentes se suministran en polvo, pasta, en solución o como recubrimiento de las varillas. Para aplicar el fundente se calienta el extremo de la

varilla y se introduce en el fundente. A medida que se va soldando se irá introduciendo la varilla en el fundente. También se puede espolvorear el fundente sobre el material base. Los fundentes en forma de pasta se aplican con un pincel sobre el metal base (34).

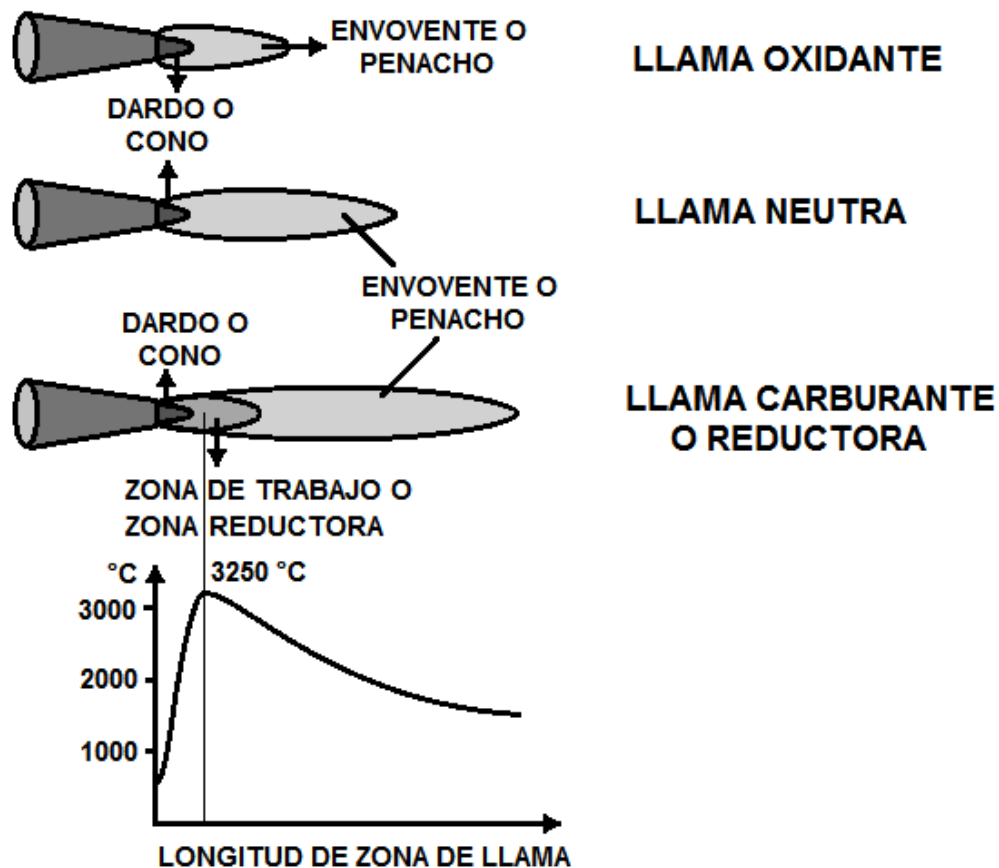


Figura 4.17. Esquema del equipo del proceso de soldadura oxiacetilénica

En operaciones de corte, la llama es concentrada para precalentar y oxidar el metal rápidamente, mientras que un chorro de oxígeno es dirigido al área precalentada, para oxidar y expulsar la escoria formando la ranura. En los sopletes de corte se tiene una serie de llamas pequeñas alrededor de un orificio central, por el que sale un flujo considerable de oxígeno puro, que es el que oxida y corta el metal. El proceso de corte con llama oxidante es el más antiguo de todos los procedimientos de corte metálico, además, el más difundido por todo el mundo. No existe un método más usado en el ámbito mundial, no importa el código ni las especificaciones, en estructuras metálicas, el gas estará siempre presente como

número uno en el proceso de corte. Es importante seguir los procedimientos de soldadura y corte, aunque no sean muy peligrosos, ya que esta forma se hace una operación más eficiente y segura. El equipo necesario para efectuar estos procesos de soldadura y corte incluye una antorcha de soldadura o soplete con juego de boquillas, una extensión o accesorio para alargar mangueras, válvulas reductoras de presión, válvulas de seguridad o anti retroceso, reguladores, oxígeno y acetileno u otro gas combustible. La función principal de los equipos de soldeo oxi-acetilénico es suministrar la mezcla de gases a una velocidad, presión y proporción adecuadas. La proporción de flujo de gas afecta la temperatura, cantidad de metal fundido, presión, velocidad de manejo del soplete y velocidad de calentamiento (27, 34).

Los gases utilizados son almacenados en botellas o cilindros para facilitar el transporte y la conservación de los gases comprimidos; los cilindros están diseñados para gases específicos y no son intercambiables. El acetileno presenta un gran peligro de explosión por presión, ya que en ausencia de aire una presión de 2 atmosferas puede ser suficiente para provocar dicha explosión. Para el llenado de las botellas de acetileno, se realiza en primer lugar la disolución del gas en la acetona y posteriormente se introduce ésta solución en la botella hasta una presión máxima de 15 atmosferas. De esta manera se consigue embotellar en una botella de 40 litros aproximadamente unos 6000 litros de gas. Se deberá tener mucho cuidado a la hora de abrir la válvula, ya que al dejar escapar el gas, éste puede arrastrar acetona, por ello nunca se deberá alcanzar el consumo de 0.3 litros/segundo (34).

Los manorreductores o válvulas reductoras de presión son los encargados de suministrar el gas comprimido de los cilindros o depósitos a la velocidad y presión de trabajo. Estas válvulas además de reducir la elevada presión de los cilindros de gas, deben permitir que la presión de trabajo a la que suministran el gas permanezca invariable durante su funcionamiento, a pesar de la disminución de la presión en el cilindro o depósito a medida que se disminuye el contenido de gas. Los manorreductores conectados a los cilindros deben tener dos manómetros, uno de ellos indica la presión del cilindro (manómetro de alta presión) y el otro indica la presión de trabajo (manómetro de baja presión). Los

manorreductores utilizados en las baterías de cilindros o en los depósitos pueden tener un solo manómetro para toda la batería. Cada manorreductor debe utilizarse solamente para lo que ha sido diseñado, es decir, solamente para el gas especificado y para el lugar que será destinado (cilindros o depósitos).

Las mangueras son tubos flexibles de goma por cuyo interior circula el gas, siendo por tanto las encargadas de transportar dicho gas desde los cilindros al soplete. Las mangueras suelen ser de caucho de buena calidad y deben tener gran resistencia al corte y a la abrasión. Los diámetros interiores son generalmente de 4 mm a 9 mm para el oxígeno y de 6 mm a 11 mm para el gas combustible. Es conveniente que la longitud no sea inferior a 5 m, aunque la distancia entre el cilindro y el soplete sea pequeña, para permitir libertad de movimientos al soldador. Con la finalidad de poder distinguir en el gas que circula por estas mangueras, las de acetileno son de color rojo y con rosca izquierda al soplete, y las de oxígeno son de color verde y con rosca derecha al soplete. La misión principal del soplete es asegurar la correcta mezcla de los gases combustible y comburente según su cantidad, de forma que exista equilibrio entre la velocidad de salida y la de inflamación. Mediante el soplete el soldador controla las características de la llama y maneja la misma durante la operación de soldeo. La potencia de un soplete se mide en litros/hora y expresa el consumo de gas combustible. La elección del tipo y tamaño del soplete depende de las características del trabajo a realizar; las partes principales de un soplete son:

* **Válvulas de entrada de gas:** permiten regular la presión, velocidad, caudal y proporción entre el gas combustible y el oxígeno.

* **Cámara de mezcla:** en ella se realiza la mezcla íntima de combustible y comburente. Existen dos tipos fundamentales de cámaras de mezcla, las de sobrepresión y las de inyección o aspiración. En las cámaras de mezcla de sobrepresión el oxígeno y el gas combustible están a presiones similares y van a la misma velocidad, mezclándose al juntarse las direcciones de ambos gases. En las cámaras de mezcla de inyección o aspiración el gas combustible a baja presión es aspirado por la corriente de oxígeno de alta velocidad por efecto Vénturi. Este tipo de cámara de mezcla se emplea cuando el gas

combustible es suministrado a una presión demasiado baja para producir una combustión adecuada.

* **Boquilla:** son toberas intercambiables que se ajustan en la parte final o lanza del soplete. Éstas sirven para controlar el flujo de gas por medio del diámetro del orificio de salida. Las boquillas de pequeños diámetros de salida producen llamas pequeñas siendo aptas para soldar pequeñas secciones, mientras que las boquillas de grandes diámetros se utilizan para soldar grandes secciones. Es muy importante mantener limpia la boquilla, las roscas y las superficies de cierre para evitar fugas y retrocesos de llama (34).

* **Válvulas anti retroceso de llama:** Cuando se produce un retroceso de llama, ésta se introduce en el soplete o incluso puede llegar a través de las mangueras a los cilindros de gas y provocar su explosión. Las válvulas anti retroceso previenen la entrada de oxígeno o de aire en el conducto y cilindro que subministra el acetileno, también previenen un retroceso de llama dentro del soplete, mangueras, tuberías, cilindros o depósitos. Estas válvulas evitan el suministro durante y después de un retroceso de llama. Si el retroceso de llama ha sido muy leve en algunos casos no se corta el suministro de gas. Solamente se corta si la temperatura ha aumentado hasta 100 °C aproximadamente. Las válvulas anti retroceso se colocan justo a la salida de las válvulas reductoras de presión para proteger los cilindros. Una opción más correcta sería colocarlas en la entrada del soplete, pero no suele utilizarse porque aumenta el peso con la consiguiente dificultad para el soldador. En caso de mangueras muy largas, además de la situada a la salida de las válvulas reductoras también pueden situarse en algún punto del recorrido de las mangueras como medida de precaución (18, 34). En la figura 4.18, se observa un esquema del proceso de soldadura oxi-acetilénica.

4.6.1. Preparación de las juntas

La buena ejecución de cualquiera de estos procedimientos de soldadura, depende casi en su totalidad de la preparación de las áreas que van a ser soldadas, comenzando con la limpieza y teniendo en cuenta que el proceso será básicamente una reacción físico - química, cualquier agente contaminante que esté presente, al momento de la unión, se convertirá en

parte de la soldadura, mezclándose químicamente y afectando el estado final de la composición. Por tal motivo, la limpieza juega un papel importante y se puede realizar por dos formas (18):

Mecánica: Las áreas deben ser limpiadas con una acción mecánica efectiva como papel de lija, pulidoras, bandas abrasivas o lanas metálicas entre otras. Hay que tener cuidado en la limpieza, ya que existe la posibilidad de que las partículas producidas en el limado se introduzcan en las tuberías cuando son limpiadas mecánicamente (18).

Química: En muchos de los casos la limpieza mecánica es adecuada y suficiente, pero si fuera necesario limpiar más profundamente, como en el caso de las tuberías que llevan presiones considerables o sujetas a tensiones mecánicas de algún tipo, como en el caso de la refrigeración, en donde se usan solventes como acetona y se debe evitar el uso de solventes con base de cloro (18).

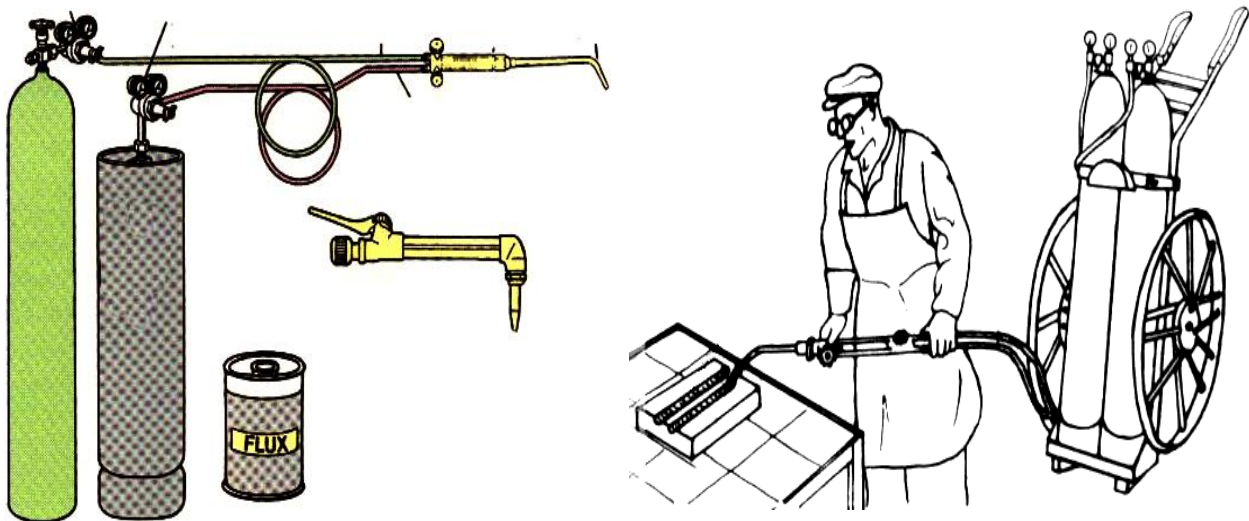


Figura 4.18. Esquema del equipo del proceso de soldadura oxiacetilénica (18, 40)

4.7. Soldaduras a baja temperatura

Para hablar de soldadura a baja temperatura, debemos aclarar la definición de los dos diferentes procedimientos básicos que se pueden ejecutar para unir dos metales, aunque en casi todos los idiomas tienen nombres diferentes y la aplicación de cada uno de estos

procedimientos es muy específica, esto no ha permitido que los procedimientos se difundan y se reconozcan como aplicaciones de procedimientos específicos, por tal motivo son llamados por sus nombres en inglés *Brazing* (soldadura fuerte) y *Soldering* (soldadura blanda); a continuación se estudiará un poco sus definiciones para ver las diferencias (18).

4.7.1. Soldadura fuerte (*Brazing*)

Es el procedimiento de unir dos metales usando un metal de aporte, por lo general no ferroso, con una temperatura de fusión por encima de 430 °C, pero siempre menor que el punto de fusión del metal base. Habitualmente se requiere de fundentes especiales para remover los óxidos de las superficies a unir y aumentar la fluidez del metal de aporte. Algunos de los metales de aporte son aleaciones de cobre, aluminio o plata. Además el metal de aporte es distribuido en la zona soldada por atracción capilar o por difusión. Las tres características principales de la soldadura fuerte son (18):

- Las partes a unir no se deben fundir.
- El metal de aporte debe mojar la superficie del metal base y unirlo por la acción capilar.
- El metal de aporte debe tener un punto de fusión por encima de 430 °C y menor que el punto de fusión del metal base.

Cuando se diseña una unión por este método, se deben tener en cuenta los siguientes factores: (18)

- Tipo de unión que se requiere.
- Espacio entre las partes.
- Acabado de las superficies de empalme.
- Colocación del metal de aporte.
- Posibilidad de que haya gas atrapado en la soldadura.

La soldadura fuerte se puede clasificar por la forma como se aplica el metal de aporte.

A continuación se describen algunos de estos métodos:

Por soplete: El calor se aplica de manera local en las partes del metal a unir, con una antorcha para gas combustible, combinado con oxígeno o aire. El metal de aporte casi siempre en forma de alambre se derrite en la junta. Sus ventajas radican en que es un método flexible y aplicable a muchos ensambles, el calor se aplica localmente y los equipos son económicos. Sus desventajas son lo lento del proceso, requiere de la habilidad del operador, la pieza se oxida durante el trabajo, son pocos los metales base para este proceso y el calentamiento localizado ocasiona deformaciones (18).

Por inmersión: El metal de aporte que está previamente fundido, se introduce entre las piezas que se van a unir, cuando este solidifica, las piezas quedan unidas, por tal motivo permite realizar muchas soldaduras a la vez, pero sus aplicaciones son limitadas, las juntas deben estar limpias y con buen fundente, además el baño debe ser grande para que el descenso de la temperatura sea lento durante la inmersión (18).

En horno: El metal de aporte en estado sólido, se pone entre las piezas a unir, en forma de hoja, pasta, polvo o por rociado. Estas son calentadas en un horno con atmósfera reductora, para que se funda el metal de aporte y genere la unión al solidificarse. Sus ventajas son: calentamiento uniforme, reduciendo la deformación; control de la temperatura y de la carburación o descarburación del material, se obtienen superficies brillantes, es bueno para altas producciones en serie y sus desventajas son que no permiten un calentamiento localizado, los equipos son costosos y requieren de accesorios y dispositivos adicionales al equipo para una buena operación (18).

Por electricidad: La temperatura de las partes a unir y del metal de aporte se puede lograr por medio de conducción de corriente (Método de resistencia), ya que la pieza se calienta por la resistencia que pone la pieza al paso de corriente, el método por inducción, se realiza utilizando una bobina sometida a una corriente de alta frecuencia que induce corrientes parásitas en la pieza de trabajo para calentarla; hay que tener en cuenta que este proceso sólo se aplica a materiales electromagnéticos (18).

4.7.2. Soldadura blanda (*Soldering*)

Es el procedimiento de unir dos metales por medio de otro metal llamado de aporte; este se aplica en estado líquido, entre las piezas a unir. La temperatura de fusión de estos metales no es superior a los 430 °C. En este proceso se produce una aleación entre los metales por atracción capilar o por difusión y con ello se logra una adherencia que genera la unión. Los metales de aporte generalmente utilizados son aleaciones de plomo y estaño, que funden entre los 180 °C y 370 °C. Este tipo de soldadura es usado para la unión de piezas que no estarán sometidas a grandes esfuerzos. Una de las aplicaciones es la unión de elementos en los circuitos eléctricos. En la tabla 4.1 se hace un cuadro comparativo entre los procesos de soldadura *Brazing* y *Soldering* (18).

Tabla 4.1. Tabla comparativa entre el proceso *brazing* y el *soldering* (18, 33)

<i>Brazing</i> – Soldadura fuerte	<i>Soldering</i> – soldadura blanda
Trabaja a temperaturas superiores a 430 °C	Trabaja a temperaturas inferiores a 430 °C
Resiste altos esfuerzos mecánicos hasta los 200 °C	Sólo soporta pequeñas cargas a baja temperatura
Limpieza estricta y rigurosa	La limpieza no es estricta
Piezas consistentes	Piezas delicadas
Aleaciones de bronce, latón y plata	Aleaciones de plomo y estaño
Fundentes compuestos por bórax, ácido bórico en forma de líquido, pasta y polvo	Fundentes compuestos por cloruros, ácidos orgánicos, resinas y aluminio

4.8. Soldadura por espárragos

Es un proceso de soldadura de dos pasos, en el cual un metal, en forma de espárrago o similar y la pieza a soldar, son calentados por medio de un arco formado entre ellos, para luego aplicar presión entre las superficies para lograr la unión. Puede haber protección parcial por medio de un casquillo cerámico que rodea el espárrago, con fundente y a veces se emplea protección gaseosa. En este proceso, la pistola mantiene el espárrago contra la pieza y se hace pasar una corriente eléctrica que fluye a través del espárrago hacia la pieza

y la pistola se levanta para producir el arco eléctrico y fundir el extremo del espárrago y la superficie adyacente al espárrago. Un temporizador en el circuito corta la corriente y dispara el espárrago dentro del baño de metal fundido para producir la soldadura, en donde la solidificación es inmediata. Se levanta la pistola del espárrago y se hace salir el casquillo cerámico. El espárrago lleva generalmente un fundente en su extremo para limpiar el baño metálico y crear una atmósfera protectora, estos fundentes se utilizan para la soldadura de metales ferrosos, aunque el tiempo del arco es tan pequeño que a veces no se requiere de fundente. Para soldaduras de metales no ferrosos generalmente se hace la soldadura con protección gaseosa. Este proceso puede ser semiautomático o automático y los espárragos se pueden soldar en todas las posiciones, es un método empleado en la fabricación de barcos, puentes, edificios, automóviles, calderas entre otros (Ver figura 4.19) (18).

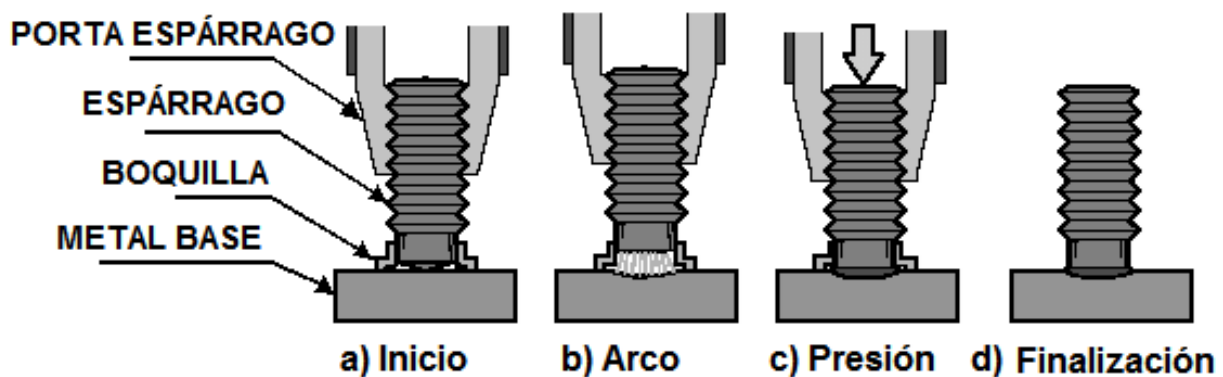


Figura 4.19. Esquema del proceso de soldadura por espárragos (18, 30, 33)

4.8.1. Fuente de potencia

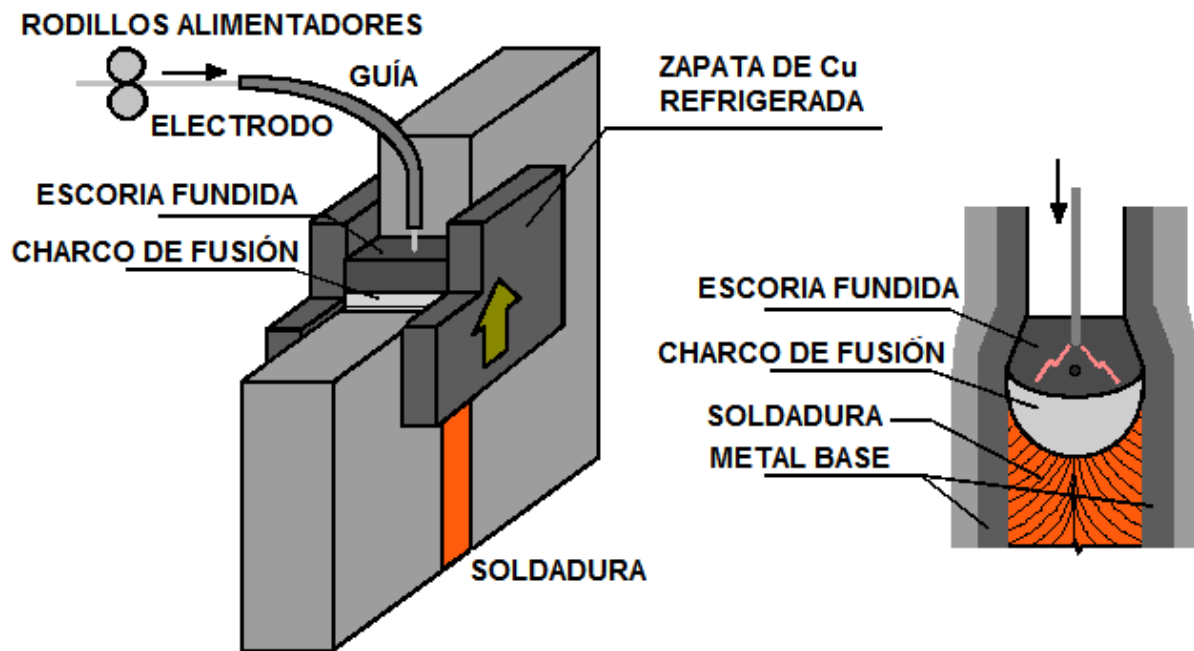
La fuente de potencia es muy sencilla, ya que puede ser un generador, un transformador – rectificador o un acumulador de batería. La utilización del casquillo cerámico es para proteger y controlar el arco de soldadura, concentrar el calor en el área a soldar y para retener el metal fundido de la soldadura. En la soldadura por espárragos para aleaciones ferrosas, el espárrago es generalmente negativo y la pieza a soldar positiva y para aleaciones no ferrosas se hace de manera inversa (18).

4.9. Soldadura por electro-escoria (ESW)

En este proceso, el fundente es colocado en las juntas y se derrite por la acción de una resistencia eléctrica, la cual a su vez funde el metal de aporte y las superficies de la pieza a soldar, produciendo un baño de escoria. Cuando la temperatura de este baño de escoria se incrementa, también lo hacen sus capacidades eléctricas y el arco se extingue o apaga, ya que la corriente es conducida a través del cordón de escoria que cubre las juntas, donde la energía para la soldadura es producida a través de la resistencia generada por el paso de la corriente. No es considerado como proceso de soldadura hasta que el fundente se licue y se hace conductor. A medida que la soldadura progresa, el metal fundido es protegido por la escoria y cuando el metal fundido se solidifica lentamente en su progresión hacia arriba, se produce la unión de la junta compuesta por las piezas a soldar. La soldadura se realiza esencialmente en posición vertical, utilizando unas mandíbulas fijas y móviles de cobre enfriadas por agua, las cuales están en contacto con los bordes de la junta y sirven de cierre para contener el metal y el fundente líquido, en donde la superficie de la soldadura es moldeada por el contorno de las zapatas. La cabeza de soldadura se mueve hacia arriba según el proceso de avance. Uno o más electrodos pueden ser usados como material consumible, dependiendo del espesor de las láminas a ser soldadas, si el material base es de un diámetro muy alto, entonces un movimiento oscilatorio puede ser agregado (3, 18, 34) (Ver figura 4.20).

La corriente es transportada al fundente a través de electrodos consumibles y esta corriente fluye entre el electrodo y el metal base, manteniendo el fundente a una temperatura determinada por la potencia eléctrica transmitida. Para una operación satisfactoria es esencial la calidad de los fundentes y de sus compuestos para que suministren la temperatura, viscosidad y resistividad eléctrica deseada. Este proceso es casi exclusivamente automático y produce el metal de soldadura más limpio, además el fundente utilizado en el proceso refina tanto el metal base como el metal de aporte. La posición vertical de la soldadura produce una solidificación direccional al baño fundido y las impurezas metálicas flotan hacia la capa de escoria líquida. Los espesores más

empleados para este proceso son de 32 mm a 305 mm. La desventaja de este proceso es que la alta cantidad de energía aplicada contribuye a que el proceso de enfriamiento se haga muy lento, lo que conlleva a una alta alteración de la granulometría en la zona afectada térmicamente. El equipo básico comprende de una fuente con una amplia capacidad de suministro de potencia, cables de alimentación, mecanismos y controles, zapatas o mandíbulas fijas o móviles con un sistema de refrigeración por agua, metal de aporte, es decir alambre para electrodo sólido o compuesto y el fundente o electroescoria (18).



a) Esquema del proceso de soldadura

b) Esquema de la soldadura

Figura 4.20. Esquema del proceso de soldadura por electroescoria (3, 18)

4.10. Soldadura por resistencia (RW)

El funcionamiento de este proceso consiste en hacer pasar una corriente eléctrica, de gran intensidad, a través de los metales que se van a unir. Como en la unión de las partes a soldar tienen una mayor resistencia que el resto de sus cuerpos debido al espacio que hay entre las partes a unir, se generará el aumento de temperatura en la junta y con un poco de presión se logra la unión. La alimentación eléctrica puede ser un transformador en el que se

reduce la tensión y se eleva considerablemente la intensidad para aumentar la temperatura. En la figura 4.21, se observa un soldador de punto.

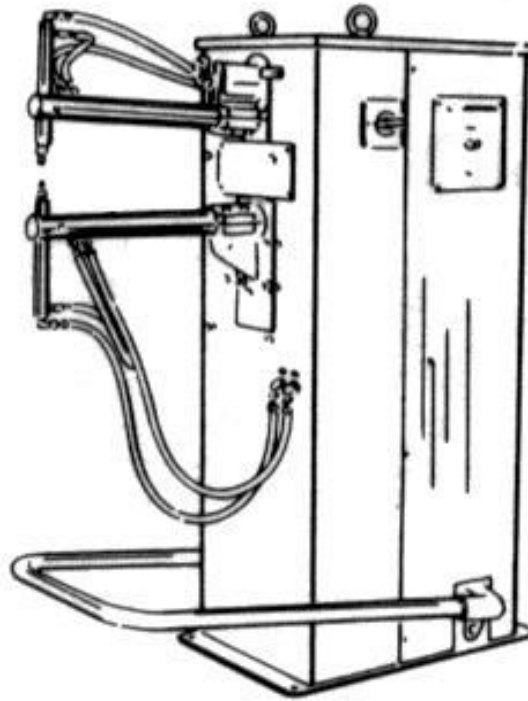


Figura 4.21. Esquema del proceso de soldadura por puntos (8, 18)

La soldadura por resistencia es aplicable a casi todos los metales, excepto el estaño, zinc y plomo. Los principales procesos de soldadura por resistencia son: (18)

- Soldadura por puntos (RSW)
- Soldadura por resaltes (RPW)
- Soldadura por costura (RSEW)
- Soldadura a tope (FW)

4.10.1. Soldadura por puntos

La corriente eléctrica pasa por dos electrodos de cobre con punta hacia la pieza de trabajo. Debido a la resistencia del material en la unión, se logra el calentamiento y con la aplicación de presión sobre las piezas se genera un punto de soldadura. El calor generado

dependerá de la resistencia eléctrica y la conductividad térmica del metal y el tiempo de aplicación de la corriente. Las máquinas soldadoras de puntos pueden ser fijas o móviles o bien estar acopladas a un robot o brazo mecánico. Este método depende más del grado de conductividad eléctrica del metal a ser soldado, que de la soldabilidad misma. Además se pueden soldar aceros de bajo carbono, aceros de baja aleación, aceros inoxidable, aleaciones de aluminio y de cobre (18).

4.10.2. Soldadura por resaltes

Es un proceso similar a la soldadura por puntos, sólo que en este proceso se producen varios puntos o protuberancias a la vez, sobre una o ambas superficies a soldar, en cada ocasión del proceso. Los puntos están determinados por la posición de un conjunto de puntas que hacen contacto al mismo tiempo. La fuerza es aplicada antes, durante y después de la aplicación de la corriente, para asegurar un circuito eléctrico continuo y para forjar las piezas calientes entre sí. Este tipo de soldadura se puede observar en la fabricación de piezas estampadas en acero de bajo carbono y de baja aleación o para soldar tornillos y piezas similares (18). En la figura 4.22, se observa diversos esquemas de los procesos de soldadura por resistencia eléctrica.

4.10.3. Soldadura por costura

Se utilizan dos electrodos circulares giratorios, con corriente eléctrica y presión para producir una serie de puntos, unos traslapados con otros, en donde la unión se produce por el calentamiento obtenido por la resistencia al paso de la corriente, la presión que se ejerce por dos electrodos circulares es constante. Este proceso de soldadura es continuo y la magnitud de la corriente, la duración del flujo de corriente, la presión de los electrodos y la velocidad de avance, deben estar todos correlacionados y deben ser escogidos y controlados correctamente para producir una costura satisfactoria. Se pueden soldar por este método aceros al carbono, de baja aleación, inoxidable, aleaciones de níquel, aluminio, magnesio y muchos aceros recubiertos (18).

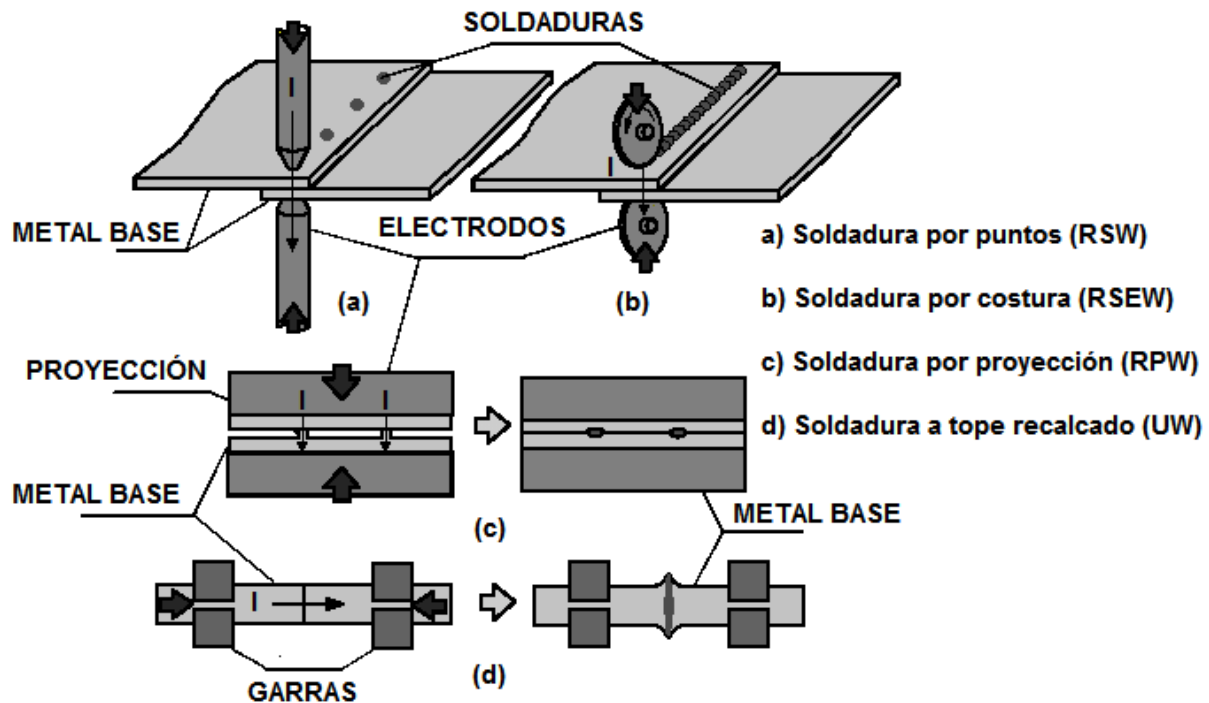


Figura 4.22. Esquema de los procesos de soldadura por resistencia eléctrica (3, 8, 18)

4.10.4. Soldadura a tope

Es un proceso en el cual dos piezas que se van a soldar se empalman una frente a la otra y se presionan cuando se está pasando corriente eléctrica por ellas, con lo que se genera calor en la superficie de contacto y con la temperatura generada y la presión entre las dos piezas se logra la unión, en donde el metal en estado plástico junto con las impurezas son expulsados fuera de la junta, con este método se pueden soldar aceros al carbono, de baja aleación, aceros herramienta, inoxidable, aleaciones de cobre, aluminio, magnesio, níquel, titanio y molibdeno (18) (Ver figura 4.22).

4.11. Soldadura en estado sólido

Este proceso de soldadura utiliza tiempo, temperatura y presión, a través de la difusión, para soldar metales por debajo del punto de fusión, las superficies a soldar se mantienen en contacto entre sí por medio de presión externa, todo el conjunto se calienta y se mantiene a

una temperatura determinada para que se produzca la difusión a través de la interface de la junta, resultando así la unión en estado sólido (18).

4.11.1. Soldadura por fricción – *Friction welding* (FW)

Es un proceso en estado sólido que aprovecha el calor generado por la fricción mecánica entre dos piezas en movimiento, para producir el calor para la soldadura por conversión directa, de energía mecánica en energía térmica, en las interfaces de las piezas a soldar, sin la aplicación de energía eléctrica u otra fuente de calor. Es utilizada para unir dos piezas de metales no ferrosos, acero y polímero o puede unir materiales de distinta naturaleza, por ejemplo: acero de alto carbono y acero de bajo carbono, aluminio y aleaciones de aluminio, acero y cobre, entre otros; lo cual le confiere innumerables ventajas frente a otro tipo de soldaduras con la que no se pueden soldar aluminio o aleaciones de aluminio. Son soldaduras altamente integrales, sin porosidad y de muy baja distorsión. Al menos una de las dos piezas tendrá que ser un volumen de revolución, generalmente cilindros. En el caso de que las dos piezas sean volúmenes de revolución se tendrán que alinear perfectamente ambos ejes longitudinales. La soldadura por fricción tiene buena resistencia mecánica, junto con gran ahorro de material y bajo tiempo de fabricación. Hay varios factores que afectan la calidad de las soldaduras por fricción incluyendo el tiempo de fricción, el tiempo de forjado, la presión de fricción, la presión de forjado, la velocidad de rotación, entre otras. Numerosos análisis se han llevado a cabo en la soldadura por fricción (FW) con el objetivo de determinar las condiciones de fabricación de soldaduras de alta calidad entre materiales diferentes. En los últimos tiempos, se están estudiando los efectos de variar la velocidad de forjado, la fuerza de fricción, la cantidad de longitud de quemadura sobre la fuerza y la calidad de la articulación (41).

La soldadura se obtiene cuando la pieza de revolución gira (cilindro) en un movimiento de rotación fijo o variable alrededor de su eje longitudinal y son suavemente aproximados en las áreas a unir, las cuales son enfrentadas de tope. Las partes tienen que ser aseguradas a un respaldo para evitar que sean separadas por la fuerza a la que son sometidas. Cuando la

cantidad de calor producida por rozamiento es suficiente para llevar las piezas a la temperatura de soldadura, se detiene bruscamente el movimiento, y se ejerce un empuje, el cual produce la soldadura por interpenetración granular. En ese momento se produce un exceso de material que se podrá eliminar fácilmente con una herramienta de corte, ya que todavía se encontrará en estado plástico. Cinco factores cualitativos influyen en la calidad de una soldadura por fricción: a) Velocidad de rotación (rpm). b) Presión aplicada, tanto en el calentamiento como en la forja. c) Temperatura de las superficies. d) Propiedades del material. e) Estado de las superficies de contacto (contaminación). Los primeros tres factores dependen del proceso mientras que los últimos dos están relacionados exclusivamente con el material a unir (41). En la figura 4.23 se observa un esquema del proceso de soldadura por fricción.

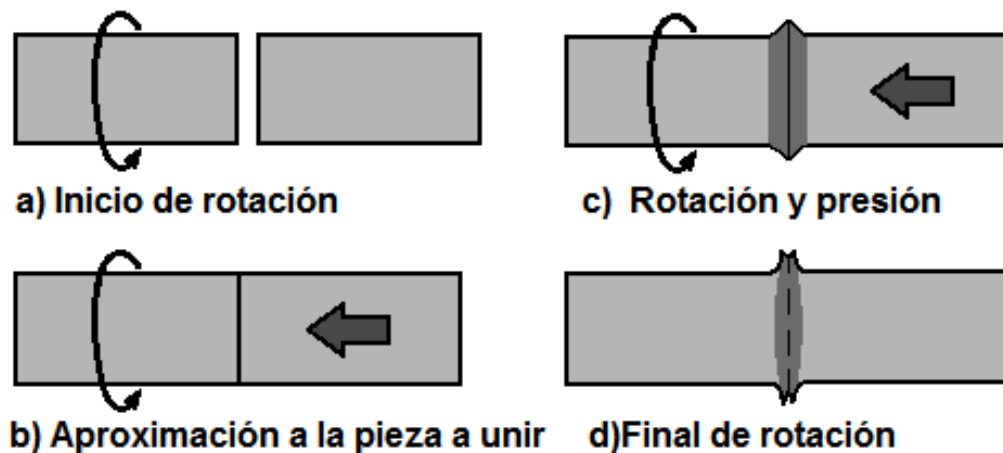


Figura 4.23. Esquema del proceso de soldadura por fricción (8, 18)

4.11.2. Soldadura por fricción – agitación (*Friction stir welding - FSW*)

La soldadura de fricción por agitación es una técnica en la que se inserta una herramienta no consumible de tipo giratorio entre las interfaces de dos láminas para crear la difusión de sus bordes y lograr la unión de estos materiales. Este proceso de soldadura en estado sólido utiliza medios mecánicos para generar el calor necesario para producir la soldadura por medio de la conversión directa de la energía mecánica en energía térmica, sin la aplicación de calor desde cualquier otra fuente. Este proceso tiene grandes ventajas en la unión de aleaciones de aluminio que son difíciles de soldar por procesos que involucran la fusión del

material base. Mediante este proceso se pueden soldar secciones gruesas en una sola pasada, obteniéndose uniones con excelentes propiedades mecánicas. La herramienta constituye la parte fundamental del proceso, se compone de dos cuerpos cilíndricos concéntricos, el de menor diámetro denominado “pin” es el que actúa en la interface de la junta y produce la plastificación, agitación y mezcla del metal, el de mayor diámetro u “hombro” trabaja sobre la superficie de la junta y es el que precalienta y consolida el material plastificado. La combinación de ambos efectos produce la recristalización y coalescencia de las piezas. La forma y tamaño de la herramienta tiene gran influencia sobre la sanidad de la unión. Durante el proceso, la misma es sometida a altas sollicitaciones mecánicas y a temperaturas próximas al punto de fusión del metal base, por lo cual el material y tratamiento empleado para su fabricación son fundamentales en lo concerniente a su vida útil. Para realizar la soldadura se procede a la inserción de la herramienta hasta que el hombro de la misma hace contacto con las superficies a soldar, aplicando para el caso una fuerza axial controlada por el desplazamiento vertical de la mesa de sujeción del material a unir o del cabezal porta herramienta (42, 43). El contacto genera calor debido a la fricción elevando la temperatura del sistema. La rotación y el avance de la herramienta a la temperatura de trabajo, dan como resultado la conformación de un flujo plástico de material que es favorecido por la geometría de dicha herramienta, el cual es agitado y mezclado hasta realizar la unión metalúrgica en fase sólida. En principio el equipo debe ser capaz de ejecutar cuatro operaciones básicas: avance longitudinal de la pieza y/o de la herramienta, ajuste vertical del husillo porta herramienta, giro del husillo sobre su eje e inclinación de éste respecto a la pieza. Cuando el equipo se emplea para la puesta a punto de procedimientos, este debe permitir operar dentro de amplios rangos de velocidades de giro y translación. Debido a los grandes esfuerzos que se producen durante la soldadura la rigidez estructural es otro requerimiento fundamental (42, 43).

4.11.3. Soldadura por forja

Es el proceso más antiguo de soldadura que consiste en el calentamiento de las piezas a unir en una fragua, horno o empleando oxi-gas, hasta su estado plástico y posteriormente se

aplica presión por medio de un martillo o por dados, lográndose la unión de las piezas. En este proceso no se utiliza metal de aporte y su limitación es que sólo se puede aplicar en piezas pequeñas y en forma de lámina. La unión se hace desde el centro de las piezas hacia afuera y debe evitarse la formación de óxidos, para esto se utilizan aceites gruesos con fundente o por lo general se utiliza bórax combinado con sales de amonio (18).

4.12. Soldadura aluminotérmica

La soldadura aluminotérmica es un procedimiento de soldadura que obtiene el calor necesario por la reacción química de una mezcla de óxido de hierro con partículas de aluminio en polvo en una proporción generalmente de 3 a 1 respectivamente. Esta reacción es fuertemente exotérmica y de reducción del óxido de hierro por el aluminio, según la reacción: (18)



En esta soldadura se utiliza un molde refractario ubicado en los extremos de la pieza a unir, dentro del cual se vierte el acero fundido producto de la reacción aluminotérmica, la cual se puede iniciar con un fósforo. El metal líquido resultante de la reacción puede alcanzar una temperatura de 2700 °C y este constituye el metal de aporte y que es capaz de fundir las paredes de la pieza a soldar. Luego del vertido el metal, se espera un lapso de tiempo y se procede a romper el molde y cortar las rebabas, para realizar el pulido de la superficie. Una vez iniciada la reacción, el proceso es muy rápido y el material fundido fluye dentro del molde, de manera calculada, quedando el acero entre los extremos a soldar y vertiendo la escoria en una cubeta. Este procedimiento se emplea para soldar piezas de maquinaria pesada en hierro y acero, es un método muy utilizado para soldar los rieles de ferrocarril.

4.13. Soldadura por arco de plasma (*Plasma arc welding* - PAW)

El soldeo por plasma pertenece al grupo de procesos que utilizan gas como medio de protección, y un arco eléctrico como medio para fundir el material base y el material de

aporte, cuando es utilizado. Esta soldadura es similar al proceso de soldadura TIG, siendo una evolución de este método, el cual está diseñado para incrementar la productividad, ya que se establece un arco eléctrico entre un electrodo no consumible de tungsteno y la pieza a soldar cuando el arco transferido, o entre el electrodo y la boquilla interna de cobre cuando el arco no es transferido. En este proceso de soldadura, el uso del gas es más complejo, ya que dos flujos de gases trabajan cada uno cumpliendo un papel diferente, por tal motivo, la antorcha o pistola tiene dos toberas una interna de cobre por cuyo interior circula el gas que formará la columna de plasma tras ser ionizado (gas de plasma) y otra tobera externa por cuyo interior circula el gas encargado de proteger el baño fundido y el arco de la atmósfera circundante (gas de protección).

La razón que exige el uso de un segundo gas de protección, radica en el carácter altamente turbulento del gas de plasma, que no tiene propiedades protectoras. En ciertos casos se emplea helio o mezclas de gases argón – helio o argón con un 5% de hidrógeno. El arco eléctrico es constreñido al verse obligado a atravesar un estrecho orificio en la tobera interna de cobre, originando una columna de plasma de alta densidad de corriente y al forzar el paso del plasma a través del pequeño orificio de la antorcha, este plasma se concentra y se intensifica la cantidad del calor a un área muy reducida, por esto se mejora la penetración al soldar y previene la desviación e inestabilidad del arco. El plasma alcanza temperaturas de 17000 °C. En la figura 4.24 se observa un esquema del proceso de soldadura por plasma. Con este proceso de soldadura se obtienen mayor velocidad de acuerdo al tipo de material y al espesor, excelente calidad y aspecto del cordón, una zona afectada térmicamente pequeña, poca deformación, soldaduras libre de chisporroteo y larga vida de servicio en el electrodo. Este proceso de soldadura tiene alta penetración, donde puede lograr la penetración total en metales con espesores hasta 6 mm con una sola pasada, obteniendo un cordón estrecho y uniforme con 100 % de penetración, además este proceso disminuye la corriente requerida, ya que para tener una penetración completa se necesita aproximadamente de $\frac{1}{2}$ a $\frac{3}{4}$ de Amperios por 0,001 de pulgada. El electrodo se encuentra ubicado en el interior de la tobera de cobre, lo que evita la posibilidad de que éste se contamine debido al contacto con el material base o el material de aporte. En caso de

utilizar material de aporte, éste se suministra exteriormente, en forma de varilla o de alambre en sistemas automatizados o mecanizados. El proceso es de operación manual o automática y se puede usar en soldaduras continuas o intermitentes, trabaja en todas las posiciones, dependiendo si se utiliza metal de aporte o no y también se pueden soldar piezas delgadas hasta 0,08 mm (18, 44).

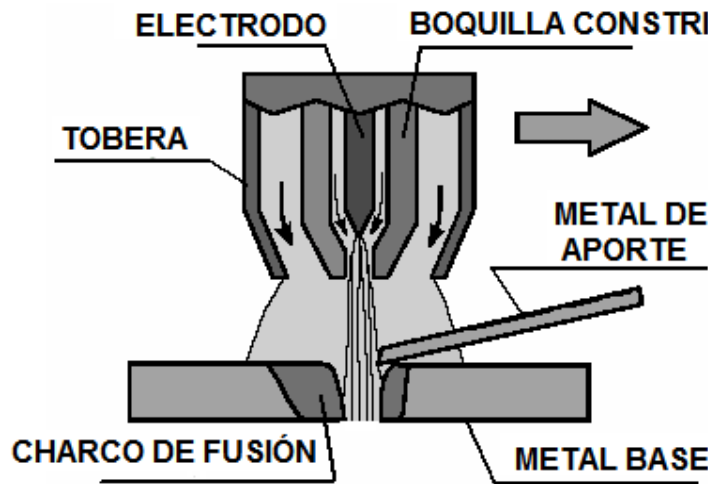


Figura 4.24. Esquema del proceso de soldadura por arco de plasma (3, 18)

La soldadura por plasma utiliza fundamentalmente corriente continua con electrodo al negativo, como alimentación y polaridad de trabajo. No obstante en este proceso se puede utilizar corriente alterna con onda cuadrada para el soldeo del aluminio y sus aleaciones. El arranque de la soldadura por plasma se realiza mediante un arco piloto entre el extremo del electrodo y la tobera de cobre que esta refrigerada con agua, el cual se hace gracias al circuito de alta frecuencia. Este arco piloto queda oculto dentro de la tobera y cuando la fuente de alimentación suministra la corriente de soldeo y/o el soplete se aproxima a la pieza a soldar, el arco es transferido de la boquilla interna a la pieza a soldar (arco transferido), que ahora actúa como polo positivo, cerrando el circuito de soldeo. Este proceso de soldadura con corriente continua usa tres formas de operación de acuerdo con el caudal del gas de plasma y la corriente de soldadura:

Soldadura de microplasma: Utiliza polaridad directa con corrientes de soldadura entre 0.1 A hasta 20 A. En este proceso se tiene una mayor densidad de energía con reducido aporte

térmico, lo que minimiza el daño térmico sobre los materiales soldados. Esto es una ventaja para soldar láminas de espesores muy finos.

Soldadura de plasma-mediano: Utiliza polaridad directa con corrientes de soldadura entre 20 A hasta 100 A. Este proceso es equivalente al soldeo por TIG, pero con la ventaja de que el plasma es más robusto y por tanto menos sensible a la distancia tobera-pieza. La penetración se puede aumentar incrementando el caudal de gas plasma, pero sin ser excesivo, ya que puede provocar turbulencias y agitar el baño de fusión generando poros en la soldadura.

Soldadura de cerradura: Utiliza polaridad directa con corrientes por encima de 100 A, donde el arco de plasma penetra espesores de pared hasta de 6 mm de una sola pasada. En este caso el alto valor de la intensidad y del caudal de gas de plasma favorece la formación de una cavidad en el baño de fusión, conocida como ojo de cerradura. Es muy usado por dejar uniones de alta calidad en la industria de la aviación y espacial, en industrias de procesos químicos y las industrias petroleras.

La soldadura por plasma, cuando trabaja con corriente alterna, lo hace fundamentalmente con onda cuadrada, ya que la onda sinusoidal convencional no ofrece buenos resultados debido a que el reencendido del arco es difícil cuando se trabaja con arcos constreñidos y altas distancias entre la tobera y la pieza. Con este método también se consigue una buena penetración pudiendo llegar a soldar 6 mm de chapa de una sola pasada, soldando en modo ojo de cerradura. Los principales parámetros de la soldadura en el proceso por plasma con polaridad directa son la intensidad de corriente, el caudal de gas plasma y la velocidad de soldeo, aunque hay que tener en cuenta otros factores que afectan la calidad de la unión soldada como el afilado del electrodo, la distancia tobera-pieza, el diámetro de la boquilla interna y su altura, el tipo de gas de protección y su caudal, así como el diámetro del electrodo y su composición. Para conseguir incrementos en la penetración en el soldeo por plasma, se puede obtener con mayores intensidades, mayores caudales del plasma y menores velocidades de soldeo. También podremos conseguir mayores penetraciones con toberas internas con orificios de menor diámetro y mayor altura (8, 33, 44). En la figura 4.25 se observa la transferencia del metal de aporte y la concentración del arco.

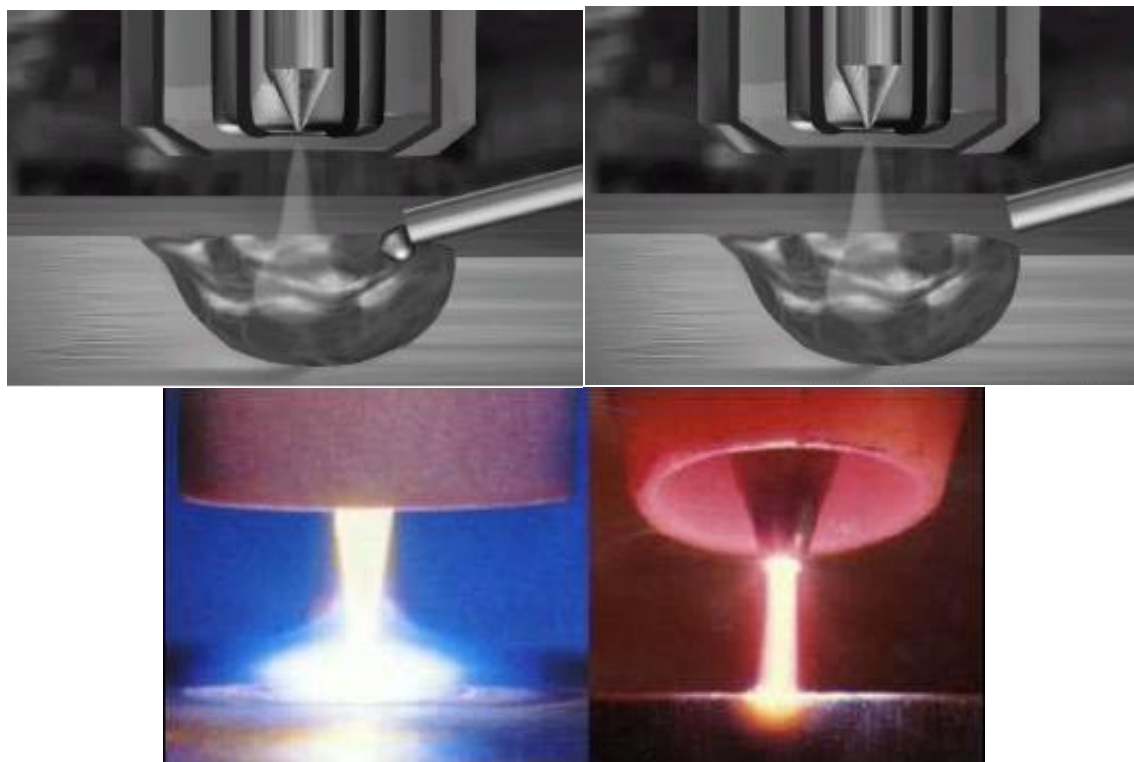


Figura 4.25. Esquema de concentración del arco en la soldadura por plasma (8, 18)

Cuando se utiliza corriente alterna con onda cuadrada en modo pulsado, las variables de soldeo son el valor de la corriente en el pico, el tiempo de duración del pulso (a la corriente en el pico), el valor de la corriente de fondo, el tiempo de actuación de la corriente de fondo, el caudal de gas de plasma durante el pulso y el caudal de gas de plasma durante el tiempo de fondo. La selección de los parámetros de soldeo en el modo pulsado está más condicionada por la obtención de un baño de fusión y un ojo de cerradura estables a la velocidad de soldeo requerida, que por el espesor de la pieza a soldar. El tiempo de fondo normalmente es igual al tiempo de pulso. Estos tiempos aseguran la formación del baño de fusión y el ojo de cerradura durante el tiempo de pulso, y la solidificación correcta del baño durante el tiempo de fondo. En este modo pulsado, los principales parámetros que determinan la penetración en la pieza son la intensidad de corriente y el caudal de gas plasma durante el pulso. Los electrodos utilizados normalmente en el soldeo plasma son electrodos de tungsteno aleado con torio al 2 %. Para cada diámetro de electrodo habrá que seleccionar un diámetro de boquilla específico y habrá que afilar la punta del electrodo con el ángulo adecuado. El extremo del electrodo cuando se alcanzan temperaturas elevadas se

va desgastando la punta, y habrá que volver a afilarlo. En el proceso de soldadura por plasma se pueden utilizar dos gases; el gas para formar el plasma que circula por la boquilla interior de cobre y el gas de protección que circula por la tobera exterior, aunque en ocasiones se puede utilizar el mismo tipo de gas. El argón es el gas más utilizado para producir el plasma, ya que asegura un menor desgaste del electrodo y de la boquilla. También se puede utilizar helio, pero debido a su baja densidad reduce la penetración siendo difícil formar el ojo de cerradura. En cuanto al gas de protección, las mezclas más utilizadas son mezclas de argón con un 2 % de hidrógeno. Con el hidrógeno conseguimos un arco más caliente y contribuye también a constreñir el arco lo que favorece la penetración o velocidad de soldeo. También pueden utilizarse mezclas de helio con argón como gas de protección. Con estas mezclas se obtiene un arco más caliente, pero también más ancho, por lo que no se logra un incremento de la penetración (8, 30, 33).

Cuando se requiera metal de aporte, se puede alimentar de forma manual con varillas o de forma automática mediante un sistema de alimentación de alambre, ya sea por bobinas o bidones. En la mayoría de los casos el material de aporte utilizado tendrá una composición química similar a la del material base. A la hora de suministrar el material de aporte al proceso, podremos hacerlo de dos maneras: por delante del baño de fusión o bien por detrás del baño de fusión. Si soldamos y alimentamos el material de aporte por detrás del baño de fusión, se controla mucho mejor el aporte de la gota, debido a que toma calor del arco controlando mejor el proceso. La velocidad de alimentación del alambre de aporte no debe ser excesiva, ya que se forman grandes gotas de metal fundido que afectan el proceso de transferencia de metal.

Fuente de potencia

El sistema de soldadura por plasma cuenta con una consola de control, desde la cual se efectúan los cambios requeridos, una fuente de potencia que debe suministrar una corriente constante, con un alto rendimiento, para que la energía de salida sea la suficiente para realizar las diferentes operaciones que se requieran, además tiene una unidad de alta

frecuencia, un control para la distribución del gas de plasma y del gas protección, un sistema de refrigeración, sistema de alimentación de alambre cuando se requiera y la antorcha o soplete. La capacidad de corriente de estos equipos puede llegar hasta los 400 A. La unidad de control se encarga de gobernar el encendido del arco piloto por alta frecuencia generando una corriente de alto voltaje y baja intensidad, el flujo de gas de plasma y de protección, el balance de la onda cuadrada y la alimentación del alambre. Existe la posibilidad de controlar el proceso de forma remota a través de otros dispositivos conectados directamente a la unidad de control, como diales, pedales, interruptores en el mango del soplete entre otros. En el soldeo plasma la antorcha o soplete, a diferencia que el soldeo TIG, consta de dos toberas: una tobera interna de cobre encargada de generar el arco piloto, además de conducir y constreñir el gas de plasma, y la segunda tobera cerámica con la misión de conducir el gas de protección al área de soldeo.

4.14. Soldadura por rayo láser

La palabra láser viene de "*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*". El láser es un haz electromagnético coherente, monocromático y de alta direccionalidad, que concentra una gran cantidad de energía en un punto pequeño. De ésta manera se consigue un cordón homogéneo y dirigido a una pequeña área de la pieza a soldar, con lo que se reduce el calor aplicado a la soldadura, reduciendo así las posibilidades de alterar propiedades químicas o físicas de los materiales soldados. Además el objetivo de la soldadura láser consiste en crear un baño fundido de metal, por absorción de la energía incidente, y en propagar este baño a lo largo de la junta. Las dimensiones del baño fundido, así como la presencia de vapores metálicos, influyen de forma significativa sobre la calidad de la soldadura. El proceso de soldadura láser es muy complejo y existen muchos aspectos que influyen en la calidad final de la soldadura, debido a que este proceso de soldadura presenta importantes diferencias, dependiendo del material y configuración de las superficies que se desean soldar. Esto debe ser considerado a la hora de diseñar el sistema de soldadura láser para una aplicación concreta. En la figura 4.26 se observa un esquema del proceso de soldadura por rayo láser.

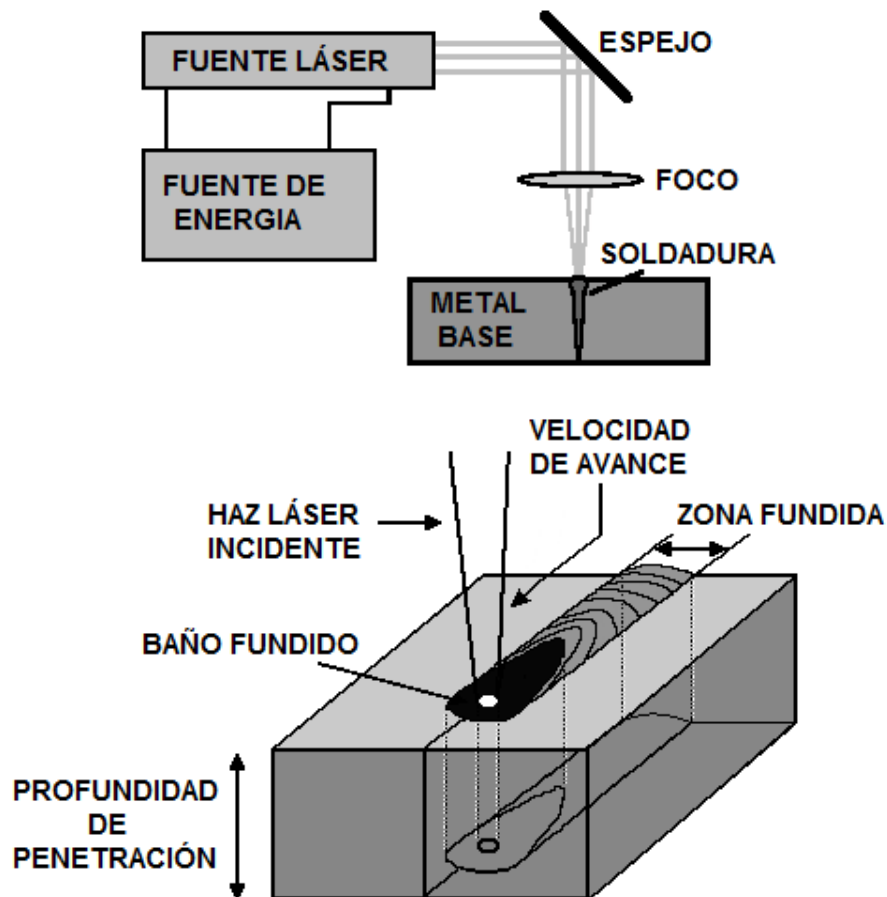


Figura 4.26. Esquema del proceso de soldadura por rayo láser (8, 18)

Existen fundamentalmente dos modos de realizar la soldadura láser: Soldadura por conducción y soldadura con penetración. En la soldadura por conducción, la energía del láser se concentra sobre la junta fundiendo el material que se encuentra a ambos lados, el cual se vuelve a enfriar rápidamente quedando soldada la junta. La superficie del baño fundido no se "rompe" con el rayo láser, a diferencia de la soldadura con penetración en la cual la superficie se abre para dejar paso al rayo láser (18).

Ventajas de la soldadura láser: (18)

- Se pueden alcanzar profundidades de penetración mayores que con otras técnicas.
- Requiere menos preparación de las juntas y casi siempre no se requiere metal de aporte.

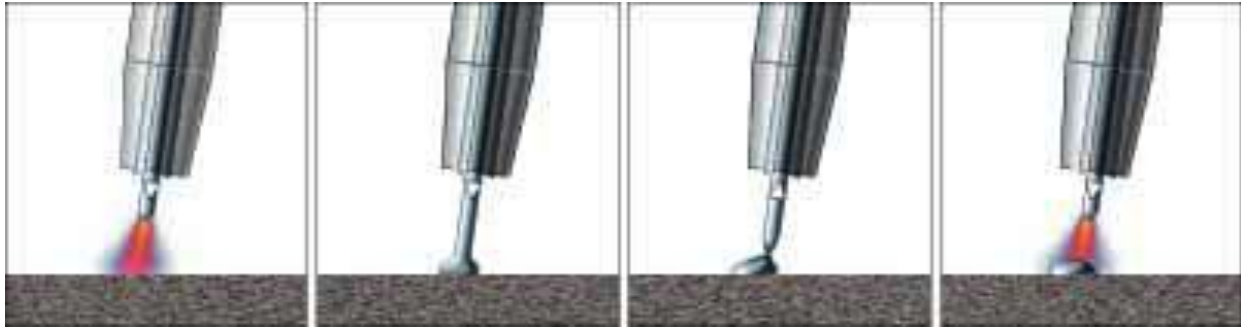
- Permite soldar varias capas de material con una sola pasada debido a la alta penetración.
- Mínima distorsión de las piezas soldadas y pequeña zona afectada térmicamente, en comparación con otras técnicas de soldadura.
- Acceso a áreas no permitidas por otras técnicas y fácil automatización del proceso.
- Altas velocidades de avance, mayor penetración y calidad de la soldadura.

4.15. Soldadura por transferencia de metal frío (*Cold Metal Transfer* – CMT)

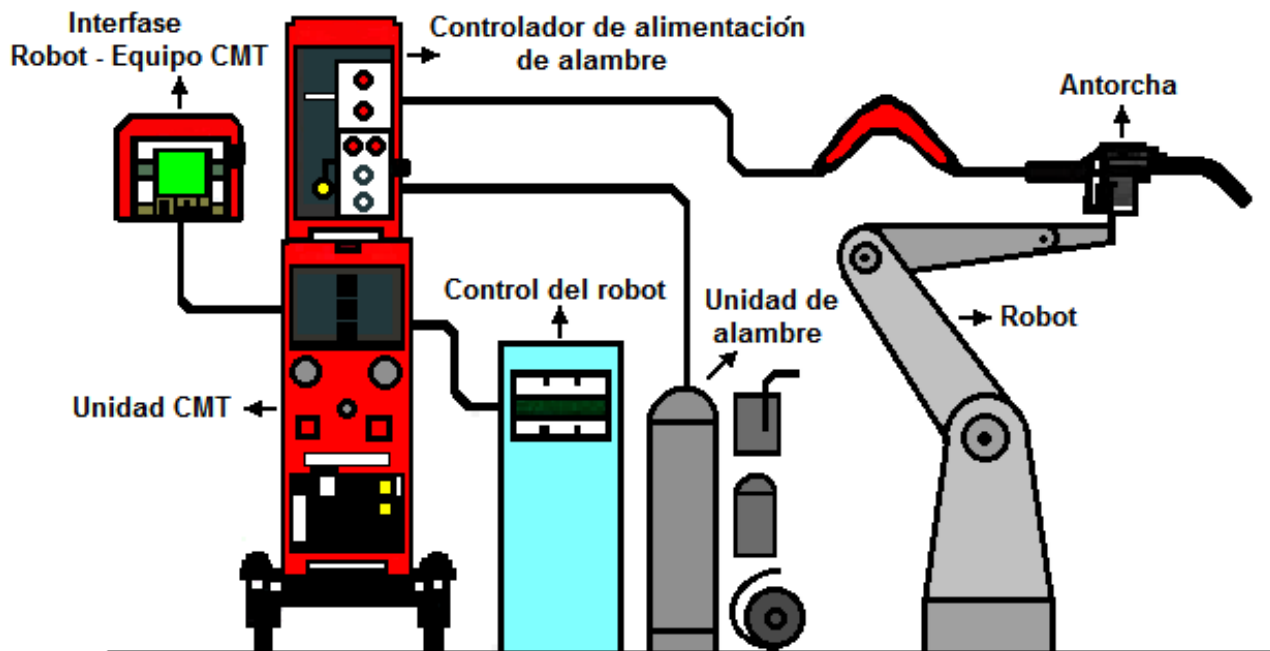
La transferencia de metal en frío (CMT) es una tecnología de soldadura relativamente nueva cuya principal característica es la baja entrada de calor. Se podría decir que este proceso es la evolución del proceso GMAW, ya que incorpora un arco corto, con una nueva técnica para desprender las gotas de metal de aporte, lo que reduce en gran medida las salpicaduras y logra transferir el metal de relleno con una muy baja entrada de calor en comparación a otros procesos convencionales, logrando soldar con bajos niveles de dilución. La tecnología innovadora proporciona una solución perfecta para la soldadura de chapa fina, que ha sido aceptada y adoptada por diversas industrias. El desprendimiento de la gota de metal se logra con la ayuda de la energía que se produce en cada corto circuito y está asociada al alto flujo de corriente, ya que por primera vez el movimiento del alambre es incorporado y controlado en el proceso, logrando el desprendimiento de la gota de metal cuando la corriente está cercana a cero, debido al movimiento hacia atrás del alambre que ayuda al desprendimiento de la gota (18, 45). En la figura 4.27 se observa un esquema del proceso de soldadura de transferencia de metal en frío.

Este proceso presenta una gran exactitud en el control de la longitud del arco, ya que la detección y el ajuste de la longitud del arco se hace mecánicamente, esto evita la inexactitud debido a la contaminación de la superficie y la velocidad de soldadura, por lo anterior se logra un proceso de soldadura extremadamente estable, con un amplio intervalo de tolerancia, con respecto a la velocidad de avance, además, la secuencia de ignición es dos veces más rápida que cualquier otro método por lo cual el metal base es fundido

rápidamente, esto da la posibilidad de unir secciones gruesas con secciones delgadas. Por otro lado, se puede combinar la transferencia de metal frío con el arco pulsado, para disminuir el impacto térmico y la distorsión de la pieza a soldar y además de mantener la geometría del cordón de soldadura y aumentar la habilidad de unir vacíos.



a) Pasos del proceso de transferencia del metal por CMT



b) Componentes del proceso de transferencia de metal en frío

Figura 4.27. Esquema del proceso de soldadura de transferencia de metal en frío (18, 36)

En su antorcha tiene un motor para el avance y retroceso del electrodo metálico obteniendo una tensión del alambre reproducible y una exactitud en el arrastre del alambre. En este proceso de soldadura es posible utilizar todos los metales base y de aporte conocidos en el proceso MIG/MAG. También se puede aplicar en todas las posiciones y en todos los tipos

de soldadura. Trabaja en espesores de lámina de 0,8 mm y con velocidad de avance hasta de 1,5 m/min. Además del ahorro de energía puede unir acero galvanizado con aluminio.

4.16. Soldadura robotizada

Los robots de soldadura son unidades programables y multifuncionales, con las que se puede realizar soldaduras de forma automática, tanto la operación de soldeo como el posicionamiento de la pieza. El robot está diseñado para ser un trabajador incansable, que ayude al operario y no para que lo reemplace. Hay dos tipos de automatización principalmente; la automatización rígida que está vinculada a máquinas especializadas para una operación específica o con un muy poco rango de operaciones y la automatización flexible que se relaciona con máquinas multipropósito como los robots. Un robot de soldadura implica un aumento de la inversión que supera ampliamente la inversión de un equipo de soldadura, ya que no solo hay que invertir en el robot, sino también en los dispositivos de sujeción de la pieza, posicionadores, sistemas de seguridad y otros periféricos. En la figura 4.27 se observa un esquema de un brazo robótico.

Los robots reducen el costo operativo, incrementan la producción, aumentan la calidad y humanizan el trabajo, liberando al operario de trabajos peligrosos, desagradables o monótonos, Además disminuye desperdicios, genera más espacio en la planta, mejora el rendimiento de otras máquinas y disminuye los costos de seguros y seguridad social. Cuando se requiera soldar un gran número de piezas iguales es conveniente soldar con robots, ya que el ahorro en el costo directo de producción logra amortizar el costo de inversión inicial del robot, sus dispositivos y programación. El incremento en los procesos productivos ha llevado al uso de sistemas automáticos (robots) principalmente para soldadura por puntos y soldadura por arco. El mayor desarrollo de la soldadura robotizada está en la industria automotriz, en donde la utilización masiva de estos, comenzó en la década de los 80 y hoy en día se amplía su uso y la variedad de robots. En la fabricación de un automóvil se hacen más de 5000 puntos de soldadura y en su mayoría son hechas por robots. Un robot suelda a la misma velocidad que un hombre, la ventaja es que el robot

puede pasar el 85 % del tiempo soldando, mientras que el hombre solo suelda un 30 % del tiempo, ya que el resto del tiempo lo gasta ajustando la pieza y parando para observar cómo va quedando el cordón de soldadura. La soldadura robotizada es uno de los procesos más exitosos del mundo, en donde un tercio de los robots industriales son para soldadura. Los robots requieren una interfaz hombre-máquina, ya que necesitan ser programados, se recomienda que el programador sea un buen soldador, porque así sabrá cuando una soldadura está bien realizada y cuando la soldadura presenta algún problema. Este problema se puede deber al gas protector, al electrodo o a la programación del robot. Un programador que no sepa de aplicación de soldadura puede pensar que el problema se deba al controlador o algo relacionado con el robot y no saber cómo corregir el problema, mientras que alguien que entienda los procesos de aplicación de soldadura puede comprender mejor y corregir el problema.

La soldadura por arco robotizada está creciendo con rapidez y ya domina el 20 % de las aplicaciones industriales con robots para soldadura. Los principales componentes de los robots de soldadura son el manipulador (unidad mecánica) y el controlador, que actúa como cerebro del robot. El diseño de estos sistemas puede catalogarse en varias clases como robots cartesianos que tienen tres articulaciones del tipo prismáticas; robots tipo pórtico que generalmente son robots cartesianos suspendidos del techo; robots cilíndricos que tienen una articulación angular y dos prismáticas; robots SCARA que son similares a los cilíndricos, solo que tienen articulaciones que rotan en un plano paralelo al suelo; robots polares que tienen dos articulaciones angulares y una prismática y robots angulares en donde todas sus articulaciones son de tipo angular. La clasificación de los robots según el controlador puede ser de lazo abierto en donde el sistema no tiene realimentación de la posición, es decir que no sabe dónde se encuentra ubicado, y sistema de control de lazo cerrado, en donde el robot sabe en cada instante en qué posición se encuentra y esta a su vez se puede dividir en de secuencia limitada. Además los robots se pueden dividir según el accionamiento en hidráulicos, eléctricos y neumáticos. El seguimiento de la costura de soldadura se convierte en un desafío para las empresas con mayores demandas de precisión en el cordón de soldadura. En el seguimiento de la costura robotizada, el sensor juega un

la formación virtual, si se produce un error al realizar la tarea se puede eliminar el archivo y reiniciar el proceso sin costo adicional y en un período mucho más corto (47).

Aunque la aplicación de la simulación es muy beneficiosa, los soldadores no pueden ser entrenados sólo con simuladores, ya que necesitan tiempo en aplicación real de soldadura para mejorar sus habilidades. La formación de soldadores con la incorporación de simuladores está dirigida a la formación de alumnos sin experiencia en este campo, aunque se pueden formar alumnos con experiencia previa en aplicación de soldadura, ya que los niveles de aprendizaje e interacción son más elevados con la enseñanza virtual. La formación con procesos de simulación permite que los estudiantes aprendan el posicionamiento del cuerpo, distancia a la pieza, velocidad de soldeo, ángulos de la pistola o porta electrodos, velocidad de alimentación, técnica de soldadura entre otras variables, lo que facilita al estudiante a enfrentarse a un equipo real de soldadura, debido a la adquisición de una serie de conocimientos teórico – prácticos y habilidades manuales que permiten mejorar los programas de formación de soldadores, reduciendo el consumo de energía, materiales y generando menos residuos y contaminación.

El estudiante realizará un mayor número de horas efectivas aplicando soldadura y se tiene una medida de los resultados en tiempo real lo cual atrae y compromete al estudiante, además evita los accidentes propios de la primera fase de la formación. Los simuladores reproducen un equipo de soldadura real con botones que permiten moverse por diferentes menús del simulador, además tienen indicadores gráficos que dan al estudiante información en tiempo real de su técnica, ya que el simulador controla en tiempo real los errores cometidos por el estudiante. Las practicas se graban de manera automática en una USB (memoria externa) o en la unidad principal del simulador, para que el estudiante y/o el profesor puedan observar las proyecciones, escoria, porosidad, mordeduras y el correcto posicionamiento del cordón realizado además estos simuladores cuantifican el material usado el tiempo de arco del estudiante y verifica el ahorro de los costos.

papel importante y se tienen varios tipos de sensores para el seguimiento de estas costuras, como los sensores de arco, sensores de desplazamiento y sensores de visión, entre otros. Con la información recibida por los sensores se desarrolla un programa de seguimiento del cordón de soldadura que incluye diferentes módulos, como el control de potencia de soldadura, la base de datos de expertos en soldadura, la configuración inteligente de parámetros, la captura de imágenes y el procesamiento basado en algoritmos, además módulos de planificación de comunicación dentro el robot y ruta, entre otros (46).

4.17. Simuladores en la formación de soldadores

Se puede deducir que la práctica de la soldadura manual siempre será un proceso de extrema importancia para el sector industrial. Ciertas tareas relacionadas con el proceso de soldadura no pueden ser realizadas por robots, debido a la geometría compleja o la ubicación de las piezas a soldar. La soldadura manual se emplea principalmente en sistemas de producción de baja demanda, donde el proceso no puede automatizarse. En todos estos casos, el proceso de soldadura debe ser llevado a cabo por profesionales altamente calificado (47). Los simuladores permiten la formación de soldadores combinando la formación tradicional con la formación virtual, ya sea en realidad virtual o realidad aumentada. Con la implementación de la simulación en los programas de formación tradicional se puede obtener una reducción de los tiempos de formación y sus costos, además se logran un mayor número de soldadores certificados. La incorporación de los simuladores permite que los estudiantes aprendan más rápido la técnica para soldar, lo que aumenta el rendimiento escolar, ya que se dispone de más tiempo para la enseñanza de otros temas como simbología, defectología, entre otros. En un proceso normal de aplicación de soldadura, aproximadamente el 70 % del tiempo, se usa para la preparación del material y el 30 % para la actividad de soldar propiamente dicha; y si el soldador comete un error durante la aplicación de la soldadura, se debe realizar un proceso de reparación, y se tiene que reorganizar todas las etapas del proceso, o incluso, en ciertas ocasiones hay que descartar los materiales utilizados. Sin embargo, en la formación de soldadores a través de

5. CONSUMIBLES DEL PROCESO DE SOLDADURA

Hay ciertos elementos que se consumen y deben ser provistos en el proceso de soldadura para poder producir buenos cordones de soldaduras. Estos incluyen una fuente de energía para proveer el calentamiento, material de aporte y medios de protección para el metal fundido (atmósfera protectora). Los procesos de soldadura difieren uno de otro, porque disponen de estas mismas características o elementos en varias formas. El término *consumible* es aplicado a los productos que son consumidos durante la ejecución de una soldadura. Por ejemplo, en la soldadura manual con electrodo revestido, el consumible es el electrodo empleado, y en la soldadura por arco sumergido son el alambre y el fundente. En la soldadura con gas de protección incluye el gas de protección que puede ser argón, helio, dióxido de carbono o mezclas de gases, así como el alambre. También se incluyen las boquillas, piezas de reserva y la energía eléctrica empleada en la soldadura. En la soldadura oxiacetilénica incluyen los gases acetileno y oxígeno, así como las boquillas de la antorcha. Usualmente el término consumible queda restringido a los ítems controladores o influyentes de las propiedades mecánicas y de la calidad metalúrgica de la unión soldada que se consumen en el proceso (27, 33).

Una función primaria de los consumibles es proteger de la atmósfera, el charco de metal fundido de la soldadura, donde la fusión del metal puede ser generada por el arco o la combustión del acetileno, entre otros medios. En caso que no se proteja adecuadamente la zona que está siendo afectada por la soldadura, se corre el riesgo de que el nitrógeno y el oxígeno pueden reaccionar con el metal fundido, formando óxidos que perjudican el flujo y la fusión del metal e influyen la formación de inclusiones; además estos óxidos también consumen ciertos elementos de aleación. Es sabido también, que el nitrógeno forma nitruros, que pueden causar fragilidad, así como la aparición de porosidad. En la soldadura con gas de protección, empleando un gas inerte como el argón, tanto el oxígeno como el nitrógeno son excluidos pasivamente (sin reacciones). Sin embargo, algunos óxidos están siempre presentes y por eso es necesario removerlos con agentes desoxidantes tales como

silicio, aluminio o titanio en aceros; o silicio, zinc o fósforo en aleaciones de cobre. El óxido de aluminio no puede ser reducido químicamente, de tal modo que el gas de protección, usado en la soldadura con aluminio, debe ser lo más eficaz posible. La protección con dióxido de carbono, frecuentemente utilizada en la soldadura de aceros, excluye el nitrógeno a costas de que se presente la formación de óxidos, de modo que son normalmente adicionadas cantidades muy altas de desoxidantes de los necesarios. La protección contra la atmósfera, originada por fundentes generadores de escoria, es más eficaz, gracias a la capa protectora de fundente fundido y a los gases formados a partir de componentes en el fundente, que son descompuestos por el calor (27, 33, 39).

El modo de cómo es usado el desoxidante depende del proceso de soldadura. Por ejemplo se tiene que en la soldadura que usa gas de protección, el desoxidante es un elemento metálico en el alambre o en el fundente, pero en los electrodos revestidos, los desoxidantes se localizan en el revestimiento del electrodo. Frecuentemente, algunos elementos de aleación presentes en el metal actúan como desoxidantes, por ejemplo, en aleaciones de cobre con pequeños porcentajes de zinc o silicio, estos últimos hacen las veces de desoxidantes. También en metales ferrosos, donde no es usual contar con elementos de aleación para que cumplan la función de desoxidantes, ocurren reacciones complejas entre esos elementos de aleación y los consumibles; o con la atmósfera encima del metal fundido. Elementos como el carbono, silicio, manganeso, titanio, aluminio y cromo, son fácilmente oxidados, perdiéndose un porcentaje de sus contenidos iniciales durante la soldadura, en caso que el metal de adición y el flujo de gas no ofrezcan una compensación de dichos elementos (18, 27). Los consumibles poseen un efecto poderoso en el modo como el metal es transferido del electrodo para el charco de fusión. En la soldadura manual con electrodo revestido, la presencia de una gran cantidad de rutilo (óxido de titanio – TiO_2), en el revestimiento, promueve una transferencia suave de pequeñas gotas de metal fundido, pero con un alto contenido de carbonato de calcio (CaCO_3), la transferencia ocurre en grandes glóbulos que hacen corto-circuito con el charco de fusión (18, 27).

En los procesos de soldadura GMAW, cuando se utilizan gases de protección como argón o helio, en la soldadura de aceros, es necesario adicionar pequeñas cantidades de oxígeno (O_2) o de dióxido de carbono (CO_2), para que la soldadura resulte en una transferencia suave y sin proyecciones de pequeñas gotas de metal fundido. Tales adiciones son perjudiciales cuando se soldan aleaciones de aluminio, pero con esos metales, la suavidad de transferencia de metal y el perfil del cordón de soldadura pueden ser modificados empleándose mezclas de argón y helio. En los procesos de soldadura FCAW, que utilizan un flujo de gas protector, se forma un residuo del fundente, denominado escoria, la cual permanece sobre la superficie del charco de fusión. La viscosidad, la tensión superficial, el punto de fusión y otras características de esa escoria, influyen en la forma final de la superficie del cordón de soldadura, así como de su mojabilidad con el metal base (el modo como el metal de soldadura se mezcla con el metal base), y la facilidad con que la soldadura puede ser ejecutada en otras posiciones diferentes a la plana. También es importante que, cuando las soldaduras fueran realizadas con chaflanes profundos, la escoria sea fácilmente removida para permitir que los cordones de soldadura posteriores sean depositados sin causar problemas. Durante el proceso de soldadura por arco eléctrico se funde el metal de aporte y el recubrimiento del electrodo y a medida que la soldadura avanza, deja detrás el metal de soldadura solidificado cubierto por una capa de fundente convertido en escoria. Esta escoria tiende a flotar sobre el metal de aporte líquido y solidifica después que el metal fundido, reduciendo la posibilidad de que sea atrapada la escoria dentro del metal de soldadura conllevando a una inclusión de escoria (Ver figura 5.1). La presencia de gas de protección es producida cuando el recubrimiento del electrodo se descompone por el calentamiento del arco, además estos gases ayudan al fundente en la protección del metal fundido. El elemento principal en el proceso de soldadura por arco con electrodo revestido es el electrodo en sí mismo; el cual está hecho de un núcleo de metal sólido o alambre (alma) y está cubierto con una capa de fundente granular, que se mantiene unido por un agente aglutinante. Todos los electrodos de acero al carbono y baja aleación usan generalmente el mismo tipo de alambre de acero como núcleo, el cual puede ser acero de bajo carbono o acero efervescente. Cualquier aleación puede ser provista por el recubrimiento, debido a que es más económico agregar aleantes de esta manera. El

recubrimiento del electrodo es la característica que clasifica a los distintos tipos de electrodos (3).

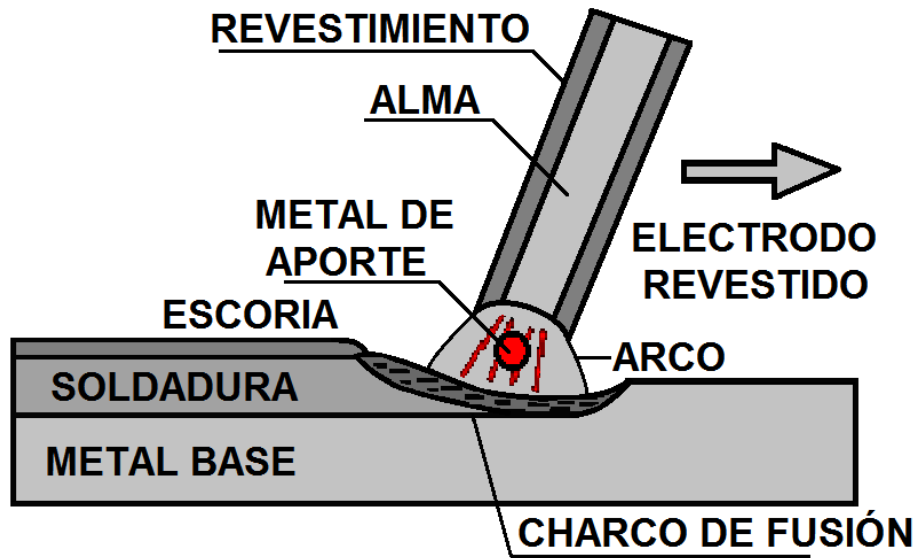


Figura 5.1. Avance del electrodo recubierto durante el proceso de soldadura (8, 18, 27)

Los recubrimientos conservan o aumentan las propiedades del depósito de soldadura. Esto se debe al tipo de componentes del revestimiento y el porcentaje de estos, sin embargo todos poseen elementos en común. Los electrodos recubiertos también se pueden clasificar en cinco grandes grupos: (18)

1. Para aceros ordinarios
2. Para aceros de alto carbono
3. Para aceros especiales y aleados
4. Para fundición de hierro
5. Para metales no ferrosos

Los aceros ordinarios son los más utilizados en las diferentes industrias, por tal motivo los electrodos recubiertos más usados son los destinados a soldar este grupo de aceros. Se fabrican electrodos para soldar los distintos metales con diferente tipo de corriente, por tal motivo unos usan corriente continua y los otros corriente alterna. Aunque algunos electrodos funcionan bien con los dos tipos de corriente, también se fabrican para soldar en

una sola posición o en diferentes posiciones, por tal motivo, algunos electrodos sirven para soldar en posición horizontal, otros para posición horizontal y en cornisa y los otros sirven para soldar en todas las posiciones. Las consideraciones de transferencia de metal, la facilidad de soldado, el control de la composición del cordón de soldadura, de la consecución de las propiedades de la soldadura y, naturalmente de los costos, son factores importantes en la selección de los consumibles adecuados. Por el lado de los electrodos, estos pueden ser clasificados en dos tipos: desnudos y recubiertos, así: (18, 27)

Electrodo desnudo: Es un alambre o varilla metálica sin recubrimiento.

Electrodo recubierto: Consiste en una varilla metálica con un recubrimiento relativamente grueso, que protege el metal fundido de la atmósfera, mejora las propiedades del metal de soldadura y estabiliza el arco eléctrico. Este electrodo es para la soldadura eléctrica y en algunos casos especiales, como en la soldadura para aluminio se puede utilizar como aporte en el proceso oxiacetilénico (18, 27).

El núcleo del electrodo está constituido por una varilla o alambre metálico, de composición similar a la del metal a soldar, y recubierta con una sustancia llamada recubrimiento, el núcleo revestido conduce la corriente eléctrica y permite establecer el arco eléctrico entre el extremo del electrodo y el metal base. El intenso calor del arco hace que se funda la punta del electrodo y el metal base, el metal fundido procedente del electrodo, en forma de pequeñas gotas, caen en el charco originado por la fusión del metal base y forman el baño de fusión, el cual al solidificar, forma el cordón de soldadura (Ver figura 5.1). El metal del núcleo depende del tipo de metal base que se requiere soldar. Si es acero generalmente se usará acero y si es aluminio el núcleo será de aluminio. Los electrodos revestidos tienen un recubrimiento grueso externo a partir de compuestos como celulosa, silicato de sodio, silicato de potasio, óxido de titanio, óxidos de hierro, hierro en polvo y otros compuestos. Los compuestos del revestimiento de los electrodos pueden ser divididos en compuestos orgánicos o inorgánicos y estos compuestos se pueden subdividir en formadores de escoria y los fundentes. Algunos de los compuestos principales, de acuerdo con sus usos son: (18)

- Los formadores de escoria son: SiO_2 , MnO_2 y FeO

- Los que mejoran el arco son: Na_2O , CaO , MgO y TiO_2
- Los desoxidantes: grafito, aluminio, aserrín
- Los que mejoran el enlace: silicato de sodio, silicato de potasio y asbestos
- Los que mejoran la aleación y la resistencia del cordón de soldadura: vanadio, cesio, cobalto, molibdeno, aluminio, circonio, cromo, níquel, manganeso y tungsteno.

Los compuestos del revestimiento desarrollan funciones específicas durante el proceso de soldadura como son: (18, 27)

1. Actuar como agente limpiador, desulfurante y desoxidante del baño de fusión.
2. Liberar gases inertes para proteger el baño de fusión de la oxidación y nitruración atmosférica.
3. Formar la capa de escoria que proteja el metal depositado de la contaminación atmosférica y disminuya la velocidad de enfriamiento del cordón de soldadura para producir una soldadura más dúctil.
4. Facilitar el encendido y mantenimiento del arco durante la ejecución de la soldadura por medio de la descomposición de elementos en gases que son ionizados.
5. Dirigir la fuerza del arco y el metal fundido en la dirección deseada.
6. Mejorar la penetración, la presentación y reducir el chisporroteo.
7. Tipo de corriente a utilizar con su polaridad.
8. Aumento del amperaje sin socavar y evitar las porosidades.
9. Aumento de la cantidad y la velocidad de depósito.
10. Aporte de elementos aleantes que mejoran y aumentan la calidad de la soldadura.

Algunos revestimientos contienen polvo de hierro que al fundir el electrodo, pasan al metal fundido, incrementando el metal depositado y la velocidad de aportación; los electrodos de bajo hidrógeno contienen en sus revestimientos sustancias como caliza, fluoruro de calcio, carbonato de calcio, silicato de aluminio, magnesio y ferroaleaciones. Estos electrodos se utilizan en la soldadura de aceros con contenidos altos de azufre o carbono, ya que estos elementos tienen gran afinidad por el hidrógeno, el cual produce porosidades y aumenta la fragilidad. El revestimiento de algunos electrodos se gasifica casi totalmente, dejando poca

escoria en el cordón de soldadura, mientras que otros casi no generan gases y la escoria sobre el cordón de soldadura es gruesa, por tal motivo, entre estos dos extremos se encuentran un gran número de tipos de electrodos. El diámetro del electrodo se mide en el núcleo y determina la intensidad de corriente promedio que se debe utilizar. Por ejemplo, para un diámetro de 5/32 in puede emplearse una corriente de unos 150 A a 200 A. En cuanto a la longitud de los electrodos, la medida más usual es la de 14 in, existiendo además electrodos de 9 in y de 10 in (18). Los electrodos deben almacenarse en lugares secos (hornos), a 15 °C por encima de la temperatura ambiente y con una humedad relativa inferior al 50 %. Cuando el electrodo se expone a la humedad, su revestimiento absorbe agua y puede desintegrarse o presentar problemas en su aplicación, además hay que evitar golpearlos, doblarlos o pisarlos, ya que se puede desprender el recubrimiento quedando inservible el electrodo. La mayor parte de los códigos requieren que los electrodos de bajo hidrógeno sean mantenidos a una temperatura mínima de 120 °C (250 °F), luego de ser abierto el contenedor de los electrodos, para mantener bajo el contenido de hidrógeno (humedad). Este horno debe ser de calentamiento eléctrico y debe tener un control de temperatura entre 65 °C y 175 °C. Debido a que este dispositivo ayuda a mantener bajo el contenido de humedad (menor al 0,2 %), además debe ser ventilado. Cualquier tipo de electrodo de bajo hidrógeno que no sea usado después de que sea abierto su contenedor hermético, deberá ser colocado dentro del horno.

5.1. Clasificación de los electrodos

En un principio todos los electrodos venían marcados con el nombre comercial del fabricante y por tal motivo estos nombres comerciales no estaban sujetos a ninguna norma, lo que dificultaba establecer comparaciones entre las distintas marcas de electrodos recubiertos. Para asegurar una cierta uniformidad, en la fabricación de los electrodos, la Sociedad Americana de Soldadura “AWS”, ha establecido una serie de códigos de identificación y a su vez de clasificación para los diferentes productos que son hechos en las fábricas de electrodos, para abastecer el mercado, estos códigos se han convertido en la referencia más comúnmente usada por su fácil reconocimiento y manejo, aunque algunos

fabricantes nombran sus productos con sus propios nombres comerciales, los usuarios prefieren llamarlos por su código de identificación de la AWS. De esta forma se asegura que los electrodos producidos por los distintos fabricantes, dentro de los parámetros de la AWS, mantengan unas características similares en el cordón de soldadura. El electrodo es muy importante en el proceso de soldadura SMAW, siendo necesario entender cómo se clasifican e identifican los distintos tipos de electrodos. Las especificaciones A5.1 y A5.5 de la *American Welding Society* (AWS), describen los requerimientos para los electrodos de acero al carbono y de baja aleación respectivamente. En la figura 5.2 se observa un electrodo con la nomenclatura de la AWS.

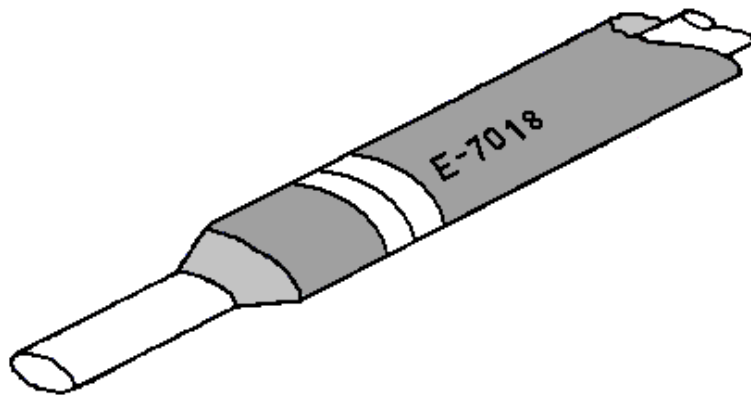


Figura 5.2. Identificación del electrodo según la AWS (8, 18, 27)

La AWS – A 5.1 clasifica y designa a los electrodos con la letra E y cuatro dígitos de la siguiente forma: (18, 27)

E - XX X X

(1) (2) (3) (4)

- (1)** La letra E lo identifican como electrodo.
- (2)** Los dos primeros dígitos se refiere a la resistencia a la fluencia, multiplicada por 1000 en psi.
- (3)** Posiciones de soldadura aptas para el electrodo y pueden ser 1,2 o 4. El número **uno** indica que puede utilizarse en todas las posiciones; el **dos** solamente para posición horizontal (Plana) y en cornisa; el **tres** no está asignado y el **cuatro** sólo se puede usar en posición horizontal (Plana).

(4) El último dígito indica la clasificación del electrodo, según la composición del revestimiento, tomando valores de 0 al 8, además especifica características de operación y las exigencias eléctricas del electrodo: AC (corriente eléctrica), DCEP (corriente continua, electrodo positivo), DCEN (corriente continua, electrodo negativo); además del tipo de penetración y calidad de la soldadura. El significado del cuarto dígito son los siguientes:

0: El recubrimiento tiene alta celulosa y sodio: Estos electrodos tienen silicato de sodio y celulosa. La protección del metal se obtiene por la atmósfera gaseosa que se genera al quemar la celulosa, la escoria que se forma es delgada y fácil de remover. Estos electrodos aportan más calor que los electrodos de los otros grupos y por tal motivo funden más cantidad de metal base y tienen una alta penetración. Estos electrodos operan con corriente directa y polaridad invertida, generan depósitos de alta calidad y aspecto plano o cóncavo (18).

1: El recubrimiento tiene alta celulosa y potasio: Estos electrodos también tienen silicato de potasio y una alta cantidad de celulosa, la cual produce gran cantidad de gases para impedir la contaminación por el oxígeno y el nitrógeno del aire, su escoria es delgada y fácil de remover, además tienen una alta penetración. La gran diferencia de este electrodo con el anterior, es la capacidad de funcionar con corriente alterna o con corriente continua y polaridad invertida. Los electrodos pueden operar en todas las posiciones. Generan depósitos de buena calidad y aspecto plano o ligeramente cóncavo (18, 27).

2: El recubrimiento tiene alto óxido de titanio y sodio: Tienen gran cantidad de óxidos de titanio o rutilo con silicato de sodio, lo cual, le da suavidad al electrodo al aplicarse y una escoria gruesa que no afecta la buena operación en todas las posiciones, además tiene una penetración media. Generan depósitos de calidad media y de forma convexa, puede funcionar con corriente alterna o con corriente continua y polaridad directa (18, 27).

3: El recubrimiento tiene alto óxido de titanio y potasio: Son similares al grupo anterior, su revestimiento es rutilico con silicato de potasio, el metal fundido es protegido por la formación de escoria sobre el cordón. Tienen un fácil encendido y mantenimiento del arco, depósitos de calidad media y de forma ligeramente convexa, su penetración es baja y puede trabajar con corriente continua y cualquier polaridad o con corriente alterna (18, 27).

4: El recubrimiento tiene alto óxido de hierro: La protección de estos electrodos es mayor, por efecto de la escoria que genera el revestimiento, la penetración es media y debido a su revestimiento rutilico, con alto contenido de óxidos y materiales desoxidantes, sólo se trabaja en posición plana o horizontal. Tiene gran velocidad de depósito y fácil remoción de escoria y puede trabajar con corriente continua y cualquier polaridad o con corriente alterna (18, 27).

5: El recubrimiento tiene sodio y es bajo hidrógeno: El revestimiento contiene calcita, caliza, fluorita y sales de sodio que lo hacen básico, además se eliminan todas las sustancias que puedan formar hidrógeno, trabajan solamente con corriente continua y polaridad invertida. Son muy suaves al operarlos, penetración moderada, casi sin chisporroteo, depósitos de alta calidad, cordones planos o ligeramente convexos y la escoria es fácil de retirar (18, 27).

6: El recubrimiento tiene potasio y es bajo hidrógeno: El revestimiento contiene una alta cantidad de dióxido de titanio y sales de potasio, trabajan con corriente alterna o continua con polaridad invertida preferiblemente. Son muy suaves al operarlos, casi sin chisporroteo, con penetración media y la escoria es fácil de retirar. Trabaja en todas las posiciones y las características del metal depositado son similares al grupo 5 (18, 27).

7: El recubrimiento tiene óxido de hierro y polvo de hierro: Estos electrodos son similares a los de alto óxido de hierro (grupo 4), la mayor diferencia entre estos electrodos está en el alto contenido de polvo de hierro, el cual aumenta la velocidad de deposición, trabajan con corriente alterna o continua con polaridad directa, penetración media, con poco chisporroteo y cordones planos (18, 27).

8: El recubrimiento tiene polvo de hierro y es bajo hidrógeno: Estos electrodos son similares a los de potasio y bajo hidrógeno (grupo 6), la mayor diferencia entre estos electrodos está en el alto contenido de polvo de hierro, el cual aumenta la velocidad de deposición, trabajan con corriente continua con polaridad invertida, fácil eliminación de la escoria y cordones convexos. Penetración media o ligera (18, 27).

Hay que tener en cuenta que la cuarta cifra no debe considerarse individualmente, sino que hay que asociarla a la tercera, considerando simultáneamente la polaridad y la posición de

soldadura. A continuación se presentan algunos ejemplos sobre la designación de electrodos según la AWS (18, 27).

Ejemplos:

E 6013: Es un electrodo que deposita un material con resistencia a la fluencia mínima de 60000 psi, puede utilizarse en todas las posiciones, su revestimiento es rutilico con sales de potasio y puede trabajar con corriente alterna o con corriente continua y cualquier polaridad.

E 7024: Es un electrodo que deposita un material con resistencia a la fluencia mínima de 70000 psi, puede utilizarse en posición horizontal (Plana), o en cornisa, su revestimiento es rutilico con alto contenido de óxidos y materiales desoxidantes y puede trabajar con corriente alterna o con corriente continua y cualquier polaridad.

Según la forma como se realiza el aporte en la soldadura, los electrodos para aceros ordinarios se pueden clasificar en electrodos de gota fría, gota caliente y de gran rendimiento. Los electrodos de gota fría producen un arco más suave con poca penetración y abundante escoria que es fácil de eliminar y se emplean en todo tipo de trabajos, tanto en producción como en reparación, los electrodos de gota caliente producen un arco más intenso con gran penetración y se utilizan para pases de raíz, los electrodos de gran rendimiento son de revestimiento grueso y contienen polvo de hierro, producen un arco suave y tienen gran velocidad de aporte, desprenden gran cantidad de escoria y dan cordones lisos de muy buen aspecto. En la tabla 5.1 se dan las características y la nomenclatura de los electrodos revestidos más usados en Colombia (18).

5.2. Selección del electrodo

En la selección del electrodo se debe tener en cuenta la buena estabilidad de arco, que produzca un cordón liso y bien presentado, con una buena velocidad de depósito, con pocas proyecciones o chisporroteo, máxima resistencia a la tracción y una fácil eliminación de la escoria. Para obtener estas características hay que considerar varios factores a la hora de seleccionar el electrodo como son: (18)

Tabla 5.1. Características de los electrodos (18, 27, 39)

TIPO	CLASIFICACIÓN SEGÚN AWS	CLASE DE CORRIENTE	PENETRACIÓN	POSICIONES	TIPO DE REVESTIMIENTO
SERIE DE LOS ELECTRODOS E-60XX	E - 6010	CC+	Profunda	P, V, C, SC	Alta celulosa y sódico
	E - 6011	CC+, CA	Profunda	P, V, C, SC	Alta celulosa y potásico
	E - 6012	CC-, CA	Mediana	P, V, C, SC	Alto óxido de titanio y sódico
	E - 6013	CC-,CC+, CA	Baja	P, V, C, SC	Alto óxido de titanio y potásico
	E - 6014	CC-, CA	Baja	P, V, C, SC	Alto óxido de hierro, rutilico
	E - 6020	CC-, CC+, CA	Mediana	P, C	Óxido de hierro y sódico
	E - 6024	CC-, CC+,CA		P, C	Alto óxido de hierro, rutilico
	E - 6027	CC-, CC+,CA	Mediana	P, C	Alto óxido de hierro y polvo de hierro
SERIE DE LOS ELECTRODOS E-70XX	E - 7014	CC-, CC+,CA	Baja	P, V, C, SC	Polvo de hierro, rutilico
	E - 7015	CC+	Mediana	P, V, C, SC	Bajo hidrógeno y sódico
	E - 7016	CC+, CA	Mediana	P, V, C, SC	Bajo hidrógeno y potásico
	E - 7018	CC+, CA	Mediana	P, V, C, SC	Bajo hidrógeno y polvo de hierro
	E - 7024	CC-, CC+,CA	Baja	P, C	Polvo de hierro, rutilico
	E - 7027	CC-, CA	Mediana	P, C	Alto óxido de hierro y polvo de hierro
	E - 7028	CC+, CA	Mediana	P, C	Bajo hidrógeno y polvo de hierro
	E - 7048	CC+, CA	Mediana	P, V, C, SC	Bajo hidrógeno y polvo de hierro

Tipo de corriente: CC+: Corriente Continua con polaridad invertida

CC -: Corriente Continua con polaridad directa

CA - : Corriente Alterna

Posiciones: P: plana V: vertical C: cornisa SC: Sobre cabeza

Propiedades del metal base: Un cordón de soldadura de calidad debe tener propiedades mecánicas similares o mayores que el metal base, por tal motivo, hay que asegurarse de la composición química del metal base y seleccionar el electrodo adecuado para este material, ya que hay electrodos para soldar diferentes tipos de materiales (18).

Diámetro del electrodo: El diámetro del electrodo que se va a usar está relacionado con el espesor del metal base, la posición a ejecutar y el tipo de junta que se va a emplear. Como regla general, no deben emplearse electrodos de diámetro superior al espesor de la pieza a soldar. Cuando se suelda en posición vertical o sobre cabeza (en techo), independientemente del espesor de las piezas a soldar, el mayor diámetro recomendable para soldar es de 5/32 in, debido a que diámetros mayores hacen muy difícil el control del depósito de soldadura. Para soldar en estas posiciones se recomienda soldar con electrodos de bajo amperaje o de gota fría, además es conveniente reducir el diámetro del electrodo, con el fin de obtener un charco de metal fundido de menor tamaño y más controlable. Para el pase de raíz o cordón con penetración, se emplean electrodos con diámetros pequeños, esto se hace para facilitar la penetración hasta el fondo de la junta y permitir un mejor control de la fusión y de la forma del cordón, por el contrario, para el relleno con pasadas sucesivas se usan electrodos con diámetros mayores para aumentar la velocidad de deposición (18).

Tipo de junta y preparación de bordes: Para el pase de raíz y en las uniones con ángulos de chaflán pequeño, se exige del empleo de electrodos de gota relativamente caliente y con gran poder de penetración. Para preparación de bordes muy separados, es conveniente el empleo de electrodos de penetración media y de gota más fría, para que se quede fácilmente entre los bordes (18).

Posición de soldadura: La posición de soldadura es uno de los factores más importantes en la selección del electrodo, ya que algunos electrodos dan mejores resultados cuando se aplican en posición plana y otros están diseñados para soldar en posición vertical, cornisa o sobre cabeza (en techo) (18).

Tipo de corriente de soldadura: El tipo de corriente da la forma y la penetración del cordón de soldadura, además hay electrodos que sólo funcionan con corriente continua y con una sola polaridad y otros funcionan con cualquier corriente y con ambas polaridades, simplemente hay que seleccionar el electrodo compatible para cada caso (18).

Rendimiento en el trabajo: La velocidad de deposición es muy importante en cualquier trabajo de producción, cuanto mayor es la velocidad de deposición menor es el costo, sin embargo, no todos los electrodos están acondicionados para dar buenos cordones de soldadura con altas velocidades de aporte. La velocidad apropiada es aquella que produce un cordón uniforme de apariencia satisfactoria. La velocidad de avance depende de los siguientes factores: (18)

- Posición de soldadura
- Velocidad de fusión del electrodo
- Espesor del material
- Condición de la superficie del metal base
- Tipo de junta
- Tipo de corriente de soldadura, amperaje y polaridad
- Ajuste de la junta
- Manipulación del electrodo

Condiciones de servicio: Los requerimientos en servicio de la pieza que se va a soldar, es uno de los factores más importantes en la selección del electrodo, ya que puede requerir de características especiales como alta resistencia a la corrosión, gran resistencia mecánica, alta ductilidad entre otros factores; por tal motivo, los electrodos se deben seleccionar para que respondan a estas características específicas (18).

5.3. Electrodo especiales

Debido a la diversidad de electrodos que componen este grupo, ya que hay una gran cantidad de aceros que presentan características y soldabilidad muy diferentes, lo que hace imposible tratarlos de la misma manera y por ello es conveniente analizarlos por separado cuando deban ser soldados. Por ejemplo, la fórmula de la temperatura de precalentamiento de los aceros al carbono y de baja aleación no es válida para los aceros de alta aleación, ya que en algunos casos puede ser muy elevada y en otros porque puede ser perjudicial, como

ocurre en los aceros al manganeso y en los aceros rápidos entre otros. Para las soldaduras es muy conveniente que el aporte de calor sea el mínimo y en ciertos casos se debe limitar el aporte de calor. Para estos casos existe una amplia gama de electrodos que trabajan con amperajes bajos, con poca aportación de calor y que son fabricados por Eutectic- Castolin entre otras empresas. Estos electrodos están diseñados para conseguir uniones suficientemente resistentes, sin necesidad de calentar el metal base a altas temperaturas. Para citar un ejemplo: para soldar una fundición gris se puede realizar en frío o en caliente, con electrodos con alto contenido de níquel que exige menores calentamientos que los electrodos ordinarios. Los electrodos de bajo aporte de calor se pueden utilizar para soldar todo tipo de metales, ferrosos y no ferrosos (18).

5.3.1. Electrodos de baja aleación

Los aceros de baja aleación tienen pequeñas cantidades de elementos como cromo, níquel, molibdeno, vanadio, magnesio entre otros elementos; en general, la suma de todos estos elementos no debe pasar del 6 % en el acero. Debido a que el metal depositado debe tener unas características similares al metal base, se tiene una serie de electrodos que producen un cordón de soldadura con la misma calidad de los aceros de baja aleación. Para clasificar los electrodos de baja aleación, además de la letra E y los cuatro dígitos mencionados (E-XXXX), se utiliza un sufijo compuesto por una letra y un número. La letra indica la clase de los elementos de aleación y el número la proporción en que se encuentra, la cantidad depende de la clasificación del electrodo y los valores individuales indican un máximo o un rango de los elementos de aleación, según la especificación AWS A5.5, así como se muestra en la tabla 5.2. (18).

Para soldar aceros de baja aleación es necesario seguir las pautas generales que se detallan:

o Limpieza: la zona de la soldadura debe tener una alta limpieza, libre de óxidos, lubricantes u cualquier suciedad que pueda interferir en el proceso; es conveniente el uso de disolventes (18).

Bisel: El bisel debe ser apropiado al espesor, la forma y la posición del material a soldar, se puede hacer por métodos mecánicos o con electrodo herramienta para biselar (18).

Pre calentamiento: para aceros de baja aleación, el pre calentamiento es necesario en muchos casos, siendo en menor o mayor grado, dependiendo de las dimensiones y la complejidad de la pieza, además la temperatura de pre calentamiento está unida al carbono equivalente del acero (18). En el capítulo 7 se profundiza este tema.

Tabla 5.2. Sufijos para electrodos de acero de baja aleación (18, 39)

Sufijo	Carbono (C)	Manganeso (Mn)	Silicio (Si)	Níquel (Ni)	Cromo (Cr)	Molibdeno (Mo)	Vanadio (V)
A1	0,12	0,6 – 1,00	0,4-0,8	--	--	0,4 -0,65	--
B1	0,12	0,90	0,6-0,8	--	0,4 -0,65	0,4 -0,65	--
B2L		0,90	1,00	--	1,0 -1,5	0,4 -0,65	--
B2	0,12	0,90	0,6-0,8	--	1,0 -1,5	0,9 -1,20	--
B3L		0,90	1,00	--	2,0 -2,5	0,9 -1,20	--
B3	0,12	0,90	0,6-0,8	--	2,0 -2,5	0,9 -1,20	--
B4L		0,90	1,00	--	1,75-2,25	0,4 -0,65	--
C1	0,12	1,2	0,6-0,8	2,0-2,75	--	--	--
C2	0,12	1,2	0,6-0,8	3,0-3,75	--	--	--
C3	0,12	0,4 – 1,10	0,80	0,8-1,10	0,15	0,35	0,05
D1	0,12	1,25 – 1,75	0,6-0,8	--	--	0,25 -0,45	--
D2	0,15	1,65 – 2,00	0,6-0,8	--	--	0,25 -0,45	--
G	--	1,00 Min	0,80 Min	0,50 Min	0,30 Min	0,20 Min	0,10 Min
M	0,10	0,6 – 2,25	0,6–0,8	1,4– 2,5	0,15-1,5	0,25-0,55	0,05

Cordón de soldadura: para soldar aceros de baja aleación es necesario seleccionar el electrodo más adecuado con su diámetro y amperaje apropiado, los cordones se aplican cortos y alternados para evitar el sobre calentamiento de la pieza, además de martillar cada cordón para aliviar tensiones y contrarrestar los efectos de la contracción (18).

Postcalentamiento: En especial para las piezas que se precalentaron a alta temperatura, es necesario postcalentar la pieza a 50 °C por encima de la temperatura de precalentamiento, con el objetivo de tener toda la pieza a una temperatura uniforme y evitar las trizaduras y las tensiones internas (18).

Enfriamiento lento: La pieza se debe enfriar lenta y uniformemente; para esto se debe enfriar dentro del horno o sino tapada con asbesto, cal, ceniza, etc. (18).

5.3.2. Electrodo de alta aleación (Inoxidables)

La AWS los clasifica utilizando la letra E y un número de tres dígitos que corresponden a la clasificación de los aceros de alta aleación, según la *American Iron and Steel Institute* (AISI). Después de ese número siguen los dígitos que corresponden a la posición de la soldadura, clase de revestimiento y la corriente de soldadura. En la tabla 5.3, está la clasificación para electrodos de acero de alta aleación. A continuación se da un ejemplo:

E – 308 – 16

E = Electrodo recubierto para soldadura con arco eléctrico.

308 = Según norma AISI acero de 18 % Cr y 8 % Ni.

1 = Se puede trabajar en todas las posiciones.

6 = Revestimiento básico y sales de potasio, bajo hidrógeno, corriente continua con polaridad invertida o con corriente alterna.

5.4. Consumibles del proceso de soldadura por arco GMAW

El proceso de soldadura por arco con alambre y protección gaseosa (GMAW) es un proceso semi automático, que se caracteriza por un electrodo en forma de alambre sólido, el cual es alimentado en forma continua a través de la antorcha o pistola de soldadura, y en donde la protección del metal fundido de soldadura es provista por una atmósfera de gas protector. La selección de los consumibles apropiados para una aplicación específica debe tener el objetivo de producir un cordón de soldadura con propiedades mecánicas y físicas superiores

o iguales a las del metal base y poder obtener un metal soldado de calidad; esto se consigue con la selección del alambre adecuado y el gas de protector. Para hacer esta selección se tienen en cuenta varios factores como: el metal base, las propiedades del cordón de soldadura, condiciones de limpieza del metal base, esfuerzos aplicados en servicio, posición de soldadura y tipo de transferencia de metal que se desea usar (18).

Tabla 5.3. Clasificación para electrodos de acero de alta aleación (18, 44, 48)

CLASIFICACIÓN DE LOS ELECTRODOS DE ALTA ALEACIÓN							
Clasificación AWS	CARBONO	SILICIO	CROMO	NÍQUEL	MOLIBDENO	COLUMBIO	MANGA - NESO
E- 308- 16	0,08	0,90	18,0 – 21,0	9,0 – 11,0			2,5
E- 308L-16	0,04		18,0 – 21,0	9,0 – 11,0			2,5
E- 309- 16	0,15	0,90	22,0 – 25,0	12,0–14,0			2,5
E- 309Cb- 16	0,12	0,90	22,0– 25,0	12,0 – 14,0		0,7 – 1,0	2,5
E-309Mo-16	0,12	0,90	22,0 – 25,0	12,0 – 14,0	2,0 – 3,0		2,5
E- 310- 16	0,20	0,75	25,0 – 28,0	20,0 – 22,5			2,5
E- 310Cb- 16	0,12	0,75	25,0 – 28,0	20,0 – 22,0		0,7 – 1,0	2,5
E- 310Mo-16	0,12	0,75	25,0 – 28,0	20,0 – 22,0	2,0 – 3,0		2,5
E- 312- 16	0,15	0,9	28,0 – 32,0	8,0 – 10,5			2,5
E- 316- 16	0,08	0,9	17,0 – 20,0	11,0 – 14,0	2,0 – 2,5		2,5
E- 316 L- 16	0,04	0,9	17,0 – 20,0	11,0 – 14,0	2,0 – 2,5		2,5
E- 317- 16	0,08	0,9	18,0 – 21,0	12,0 – 14,0	3,0 – 4,0		2,5
E- 318- 16	0,08	0,9	17,0 – 20,0	11,0 – 14,0	2,0 – 2,5	0.48 – 1.0	2,5
E- 347- 16	0,08	0,9	18,0 – 21,0	9,0 – 11,0		0.64 – 1.0	2,5
E- 410- 16	0,12	0,9	11,0 – 13,5	0,60			1,0
E-410NiMo-16	0,12	0,9	11,0 – 13,5	4,5	0,5 – 1,5		1,0
E- 430	0,10	0,9	15,0 – 18,0	0,60			1,0

Nota: En ocasiones aparecen las letras L o ELC que indican un bajo contenido de carbono. L indica que el porcentaje de carbono está por debajo de 0,04% y ELC que está por debajo de 0,02%. Si aparecen las letras Cb, indica que hay adiciones de Columbium, el cual se utiliza como elemento estabilizador y evita la formación de carburo de cromo.

La función primaria del gas protector es impedir que la atmósfera entre en contacto con el metal líquido de soldadura, pero además tiene influencia en las características del arco, el

modo de transferencia del metal de soldadura, penetración y perfil de soldadura, velocidad de avance, propiedades mecánicas, tendencia al socavamiento y acción limpiadora. Los gases usados pueden ser de tipo inerte y/o reactivo. Para algunas aplicaciones se usan gases inertes tales como el argón y el helio o combinaciones de estos dos gases. También puede usarse mezclas de gases inertes con gases reactivos como el oxígeno o el dióxido de carbono. Muchas aplicaciones de la soldadura por arco con alambre y protección gaseosa usan sólo protección de dióxido de carbono (CO₂), por su costo relativamente bajo con respecto a los gases inertes. El CO₂ es probablemente uno de los gases más populares para el acero al carbono, debido a su bajo costo y a sus excelentes características de penetración; aunque habrá más salpicadura, la cual debe ser retirada y reduce la productividad del soldador (44, 48).

Los diámetros más usuales de los alambres en este tipo de soldadura son 0,5 mm, 0,8 mm; 1,0 mm, 1,2 mm, 1,6 mm, 2,4 mm y 3,2 mm y se suministran en bobinas de 5 kg a 15 kg o en bidones de 250 kg para procesos automatizados o robotizados. Las velocidades de alimentación del alambre son altas desde 40 mm/s hasta 340 mm/s. La elección de uno de estos diámetros a la hora de trabajar es muy importante ya que para grandes diámetros se utilizan grandes intensidades de corriente y se producen grandes penetraciones, pudiendo producirse perforaciones en las piezas. Por otro lado, para diámetros pequeños se aplican bajas intensidades de corriente y se debe tener cuidado con una falta de penetración. Es importante considerar que el tensionado del alambre debe ser diferente, dependiendo si la aplicación es manual o automática. Los alambres de acero al carbono y de baja aleación suelen ir recubiertos de cobre para mejorar la conductividad del alambre con la punta de contacto y para disminuir los rozamientos, como también para que no aparezcan oxidaciones, además, el alambre puede contener pequeñas cantidades de desoxidantes y otros agentes, para evitar la porosidad o la disminución de las propiedades mecánicas del cordón de soldadura como consecuencia de la reacción del metal de soldadura con el CO₂, el oxígeno, el nitrógeno o el hidrógeno, que pueden estar en el gas de protección o la atmosfera circundante. Los desoxidantes más empleados en los alambres para acero al carbono son el manganeso, silicio y aluminio. Los electrodos usados en este proceso son

alambres sólidos que se proveen en bobinas o rollos de distintos tamaños. La *American Welding Society* de acuerdo con la especificación AWS A.518, identifica a los electrodos de alambre del proceso GMAW con las letras “ER” seguidas por dos o tres números, la letra “S”, un guión y finalmente otro número. En enero del 2016 entra la nueva clasificación AWS para los electrodos del proceso GMAW con la especificación AWS A5.36/A5.36M la cual toma todos los aspectos de la especificación AWS A5.18.

ER XX S - X

(1) (2) (3) (4)

- (1) Las letras ER lo identifican como electrodo de alambre.
- (2) Los dos primeros dígitos se refiere a la resistencia a la tracción, multiplicada por 1000 en psi.
- (3) La S es de alambre sólido.
- (4) Este número designa la composición química del electrodo.

Ejemplo:

ER70S-6: Electrodo en forma de alambre sólido con una resistencia a la tensión mínima de 70000 PSI y su composición química es: % C entre 0,06 y 0,15, % Mn entre 1,4 y 1,85, % Si entre 0,8 y 1,5, % P máx. 0,01, % S máx. 0,011 y Cu máx. 0,5.

Lo anterior determinará tanto las características de operación como las propiedades del depósito de soldadura. Es importante almacenar adecuadamente el alambre cuando este no se usa para que se conserve limpio. Si se permite que el alambre permanezca por fuera a la intemperie, se puede oxidar y contaminarse con herrumbre o aceite, humedad, partículas de polvo u otros materiales presentes en el ambiente de soldadura. Por esto, cuando no se usa el alambre debe conservarse en su plástico original, y/o contenedor de transporte. Incluso cuando un rollo de alambre está ubicado en el alimentador, debe estar con alguna protección cuando no se usa por períodos prolongados. La soldadura por arco con alambre y protección gaseosa normalmente se realiza con corriente continua, electrodo positivo (DCEP). Cuando este tipo de fuente de potencia se combina con un alimentador de

alambre, el resultado es un proceso de soldadura que puede ser tanto semiautomático, mecanizado o totalmente automatizado. Una variante del proceso GMAW es el proceso MIG (*Metal Inert Gas*), en donde el gas de protección es inerte siendo muy estable. El argón de alta pureza sólo es utilizado en soldadura de titanio, aluminio, cobre y níquel. Para la soldadura de acero se tiene que aplicar el argón con adiciones inferiores al 5 % de oxígeno ya que el argón puro produce mordeduras y cordones irregulares. Así se mejora la penetración y el ensanchamiento de la parte inferior del cordón. La utilización de helio produce cordones más anchos y una penetración menos profunda que la producida por el argón. Otra variación es el proceso de soldadura MAG (*Metal Active Gas*), en donde el gas de protección se comporta de forma inerte en la contaminación de la soldadura; por otro lado, interviene termodinámicamente en ella. El dióxido de carbono (CO₂) es uno de los gases más empleados en este tipo de soldadura. Sus inconvenientes son que produce arcos muy enérgicos, con lo que también se producen un gran número de proyecciones (salpicaduras). También tiene la ventaja que reduce el riesgo de mordeduras y faltas de fusión. La mezcla de dióxido de carbono y argón se suele utilizar con partes entre el 15 % y el 25 % de CO₂. Las ganancias de trabajar con esta mezcla son una mejor visibilidad del baño, un arco más suave, con menores turbulencias, un baño de fusión más frío, un mejor aspecto y presentación del cordón, menos proyecciones y una mejor estabilidad de arco. Su mayor inconveniente es de tipo económico. Otros tipos de consumibles de más larga duración están en la antorcha o pistola, como son la buza exterior de la antorcha que canaliza el gas hasta la soldadura y la punta de contacto que proporciona al alambre la corriente necesaria para generar el arco de soldadura; esta punta de contacto tiene su orificio interno calibrado para cada diámetro de alambre.

5.5. Consumibles del proceso de soldadura por arco con alambre tubular (FCAW)

El proceso de soldadura por arco con alambre tubular (FCAW) es un proceso semi automático, que se caracteriza por ser un electrodo en forma de alambre tubular, el cual es alimentado en forma continua a través de la pistola de soldadura, y en donde la protección del metal fundido de soldadura es provista por el fundente que está dentro del alambre

tubular y puede haber o no protección gaseosa dependiendo del tipo de electrodo que se use. Los electrodos que son totalmente protegidos por el fundente interno se les conoce como auto protectores. La *American Welding Society* de acuerdo con la especificación AWS A5.20 identificaba hasta diciembre del 2015, a los electrodos de alambre tubular para el proceso FCAW. Con la letra “E” de electrodo; seguidas por un número que designa la resistencia a la tensión multiplicada por 10000 en psi, el siguiente número designa la posición, la letra “T” de alambre tubular, continua un guión, y finalmente otro número que designa la composición química del electrodo y las características de operación. En enero del 2016 entró la nueva clasificación AWS para los electrodos del proceso FCAW con la especificación AWS A5.36/A5.36M, la cual toma varios aspectos de la especificación AWS A5.20. Este sistema de clasificación abierto utiliza designaciones para indicar el tipo de electrodo (uso), la capacidad de posición de soldadura, la resistencia a la tracción, la resistencia al impacto, el gas de protección (con más opciones y nuevas designaciones), la condición del tratamiento térmico y la composición del depósito de soldadura. Esta nueva especificación permite clasificar el rendimiento de los electrodos y los requisitos de aplicación.

E X X TX – X X X – X - X HX

(1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (10)

1. La letra E lo identifican como electrodo.
2. El primer dígito se refiere a la resistencia a la fluencia, multiplicada por 10000 en psi.
3. El siguiente número es la posición de la soldadura (0 o 1). Un cero “0” significa que el electrodo es adecuado para el uso en posición plana, filete o horizontal, mientras que uno “1” describe un electrodo que puede ser usado en cualquier posición.
4. La TX es el identificador de uso. La letra "T" lo identifica como un electrodo de núcleo fundido o alambre tubular, la cual va seguida de un número de 1 al 17 que nos da los requisitos de polaridad y características generales de operación. Si lleva la letra "G" indica que la polaridad y las características generales de funcionamiento no se especifican, sino que son acordadas entre el comprador y el proveedor. Cuando aparece una "S" al final es para decirnos que la soldadura es de una sola pasada.

5. Este número designa la protección gaseosa. La letra "G" en esta posición indica que el gas de protección no está especificado, pero es como se acordó entre el comprador y proveedor. Cuando no aparece número en esta posición, indica que el electrodo está autoprotegido y que no se usa gas de protección externo

6. Este número designa la condición del tratamiento térmico, si lo hay. "A" es para cómo soldado y "P" es para tratamiento térmico post-soldado (PWHT). La letra "G" indica que el procedimiento PWHT es como se acordó entre el comprador y el proveedor. Este número se omite cuando el electrodo que se está clasificando es para una sola pasada.

7. Este número designa la condición de temperatura del ensayo de impacto, en °F el ensayo debe ser igual o mayor a 20 ft*lb y en °C debe ser igual o mayor a 27 J. Una "Z" en esta posición indica que no hay requisitos de impacto para la clasificación. Una "G" en esta posición indica que los requisitos de impacto no se especifican, sino que son acordados entre el comprador y el proveedor. Este número se omite cuando el electrodo está clasificando para una sola pasada.

8. Este número designa la composición química del metal de soldadura. La letra "G" indica que la composición de la soldadura no está especificada, sino que está acordada entre el comprador y el proveedor. Este número se omite cuando el electrodo que se está clasificando es para una sola pasada.

9. Este número suplementario es opcional. La letra "D" o "Q", indica que el metal de soldadura cumplirá requisitos de propiedades mecánicas suplementarias con la soldadura realizada usando baja entrada de calor, usando procedimientos con altas velocidades de enfriamiento y usando procedimientos con alta entrada de calor.

10. Este número suplementario es opcional y nos dice la difusión de hidrógeno.

Ejemplo: E71T1 - C1A2 - CS1 - H4: Es un electrodo que producirá un metal de soldadura con una resistencia a la tracción de 70-95 ksi; se utiliza en todas las posiciones; es un electrodo tubular; se utiliza con gas de protección C1 (CO₂); cuando es soldado con las condiciones prescritas en esta especificación tendrá una tenacidad mínima de 20 ft * lbf a - 20 °F, (Charpy V-notch). El depósito de soldadura cumplirá con los requisitos de composición de acero al carbono CS1. El "H4" no forma parte de la designación de

clasificación de electrodos, sino que es un número opcional que indica que el metal de soldadura tendrá un máximo de hidrógeno en promedio de 4 ml / 100 g de metal de soldadura depositado.

E80T5-M21P6-Ni2: Es un electrodo que producirá un metal de soldadura con una resistencia a la tracción de 80 -100 ksi; se utiliza en posición plana y horizontal; es un electrodo tubular; se utiliza con gas de protección M21 ($15 < \text{CO}_2 \leq 25$); cuando es soldado con las condiciones prescritas en esta especificación (tratamiento térmico post-soldadura) tendrá una tenacidad mínima de 20 ft * lbf a -60 °F, (Charpy V-notch). La composición de depósito de soldadura cumple con los requisitos de Ni₂.

E80T15S-M20: Es un electrodo que producirá un metal de soldadura con una resistencia a la tracción mínima de 80 ksi; se utiliza en posición plana y horizontal; es un electrodo tubular de pase único; se utiliza con gas de protección M20 ($5 < \text{CO}_2 \leq 15$).

Con este sistema de identificación, puede determinarse si una clasificación de electrodo requiere o no gas de protección auxiliar, ya que algunos electrodos están formulados para ser usados sin ningún gas de protección adicional distinto al contenido dentro del electrodo, aunque los alambres auto protegidos aplicados con alta velocidad del viento puede tener una pérdida de la protección gaseosa del fundente interno. Los alambres que necesitan de protección gaseosa, generalmente tienen mejores propiedades en el metal de soldadura, lo que justifica el costo adicional de los gases de protección. Los gases normalmente usados son CO₂, o 75 % Argón - 25 % CO₂, aunque hay otros.

5.6. Consumibles del proceso de soldadura por arco GTAW

El proceso de soldadura por arco con electrodo de tungsteno y protección gaseosa (GTAW), se caracteriza por usar un electrodo de tungsteno que no se consume durante la operación de soldadura. El electrodo de tungsteno puede ser puro o aleado y tienen la capacidad de soportar altas temperaturas. Cuando se requiere metal de aporte, se debe adicionar de forma externa manualmente o usando algún sistema de alimentación mecánica. La *American Welding Society* identifica a los electrodos de tungsteno con la letra E que lo

designa como electrodo, luego tiene la W que es la designación química del tungsteno, continúan con letras seguidas por números que describen el tipo de aleación. Debido a que sólo hay cinco clasificaciones diferentes de electrodos, se pueden diferenciar por un sistema de códigos de colores. En la tabla 5.4 se muestra la clasificación y el código de colores de los electrodos de tungsteno.

Tabla 5.4. Clasificación para electrodos de tungsteno según AWS (3)

CLASE	ALEANTE	COLOR
EWP	Tungsteno puro	Verde
EWCe-2	1,8 % - 2,2 % cerio	Naranja
EWLa-1	1 % óxido de lantano	Negro
EWTh-1	0,8 % - 1,2 % torio	Amarillo
EWTh-2	1,7 % - 2,2 % torio	Rojo
EWZr	0,15 % -0,40 % circonio	Marrón

Al añadir torio o circonio a los electrodos de tungsteno ayuda a mejorar las características eléctricas del electrodo, haciéndolo ligeramente más emisor, facilitando el inicio y reencendido del arco con estos electrodos, ya que se incrementa el flujo de electrones, estabilizando el arco. Además estos elementos permiten utilizar mayores intensidades de corriente, ya que elevan el punto de fusión del electrodo. De este modo se evita el desgaste del electrodo de tungsteno puro que posteriormente contaminaría el baño de fusión. El tungsteno puro es más usado para soldar aluminio, debido a su habilidad para formar una terminación en forma esférica en el extremo cuando es calentado. Con una terminación esférica en lugar de aguda, hay una concentración más baja de corriente lo que reduce la posibilidad de dañar el tungsteno. El tipo EWTh-2 es el más comúnmente usado para la unión de materiales ferrosos. Los diámetros disponibles para estos electrodos son 1 mm, 1,6 mm, 2 mm, 2,4 mm, 3,2 mm, 4 mm, 4,8 mm, 5 mm y 6,4 mm, y su longitud estándar es de 150 mm.

Acabado de la punta del electrodo: La forma del extremo del electrodo es muy importante, ya que una correcta geometría favorece considerablemente la estabilidad del arco eléctrico. En general es preferible seleccionar un electrodo tan fino como sea posible, con el objetivo de concentrar el arco y obtener un baño de fusión reducido. Los electrodos para soldar con corriente continua deben tener punta, mientras la soldadura con corriente alterna la punta del electrodo debe estar ligeramente redondeado. Es importante que el amolado se efectúe correctamente, el cual debe ser efectuado en la dirección longitudinal del electrodo. La longitud de la punta también debe ser la correcta, la cual es aconsejable que sea dos veces el diámetro del electrodo. También es importante evitar el extremo puntiagudo en exceso, ya que aumenta el riesgo de desprendimiento de tungsteno y se incorpore al baño de fusión como inclusión. En la figura 5.4 se observa el esquema del afilado de los electrodos según el tipo de corriente y la dirección del afilado del electrodo.

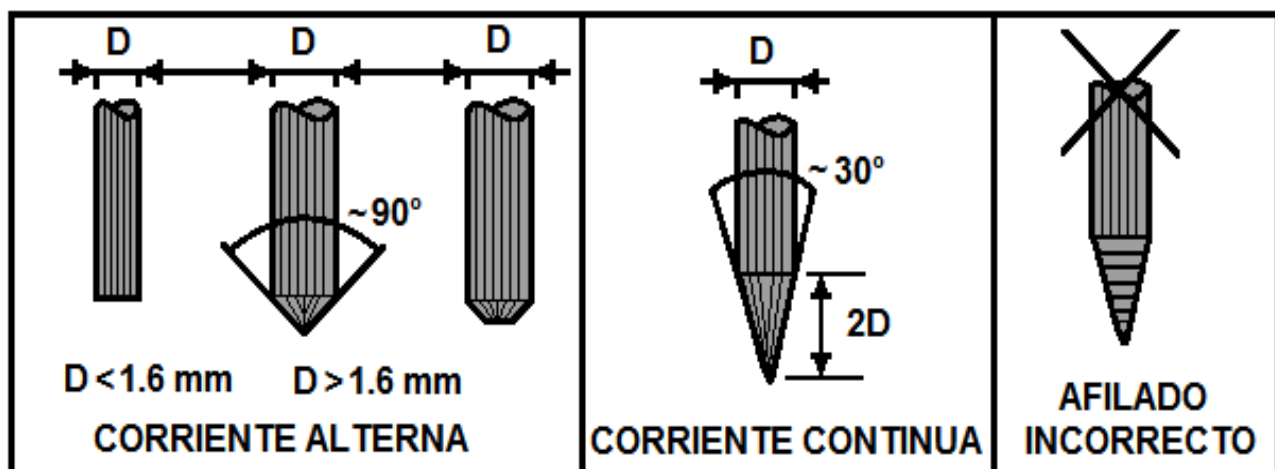


Figura 5.4. Esquema del afilado de los electrodos según el tipo de corriente y la dirección del afilado del electrodo (3, 34, 35)

Metal de aporte

El material de aporte en forma de varilla se presenta en distintos diámetros, 1,1 mm, 1,6 mm, 2 mm, 2,4 mm, 3,2 mm, 4 mm y 4,8 mm, y con una longitud de 900 mm. La *American Welding Society*, clasificada las varillas en tres tipos, bajo las siguientes especificaciones: **varillas para aceros al carbono:** estas varillas se clasifican con base en su composición

química y propiedades mecánicas del material depositado; **varillas para aceros de baja aleación:** estas varillas se clasifican de acuerdo con su composición química y propiedades mecánicas del metal depositado y **varillas para aceros inoxidables:** estas varillas se clasifican de acuerdo con su composición química y propiedades mecánicas e incluyen aceros en los que el cromo excede del 4 % y el níquel no supera el 50 % de la aleación. El material de aporte también puede ser insertos consumibles que se utilizan para las pasadas de raíz realizadas desde un solo lado y donde se requiera una alta calidad de la soldadura, así como cuando la soldadura se deba realizar en zonas de difícil acceso. Éstos generan un aporte de material extra en la raíz del cordón que asegurará una correcta soldadura. Los insertos tienen diferentes formas, por ello el diseño de la unión deberá ser compatible con la forma del inserto para conseguir soldaduras de alta calidad. Los insertos son muy empleados en tuberías para asegurar la penetración, en depósitos a presión y en estructuras. En la figura 5.5, se observan los tipos de insertos más comunes en el proceso GTAW.

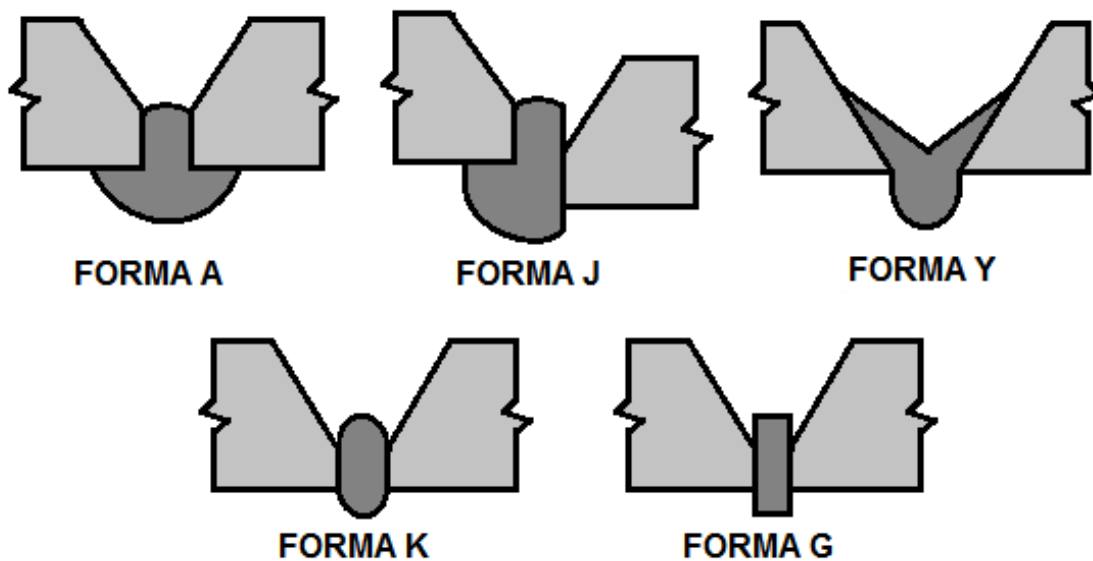


Figura 5.5. Tipos de insertos más comunes en el proceso GTAW (3, 31)

5.7. Consumibles del proceso de soldadura por arco sumergido (SAW)

El proceso de soldadura por arco sumergido se caracteriza por la alimentación continua de alambre sólido o tubular, el cual forma un arco que está cubierto por una capa de fundente

granular. La alimentación del alambre se hace de forma similar a los procesos GMAW y FCAW, con la diferencia que no necesita de protección gaseosa, ya que la protección del metal fundido del cordón de soldadura lo realiza el fundente granular, el cual forma una capa de escoria. El fundente puede reutilizarse teniendo en cuenta de no contaminarlo, aunque cuando el fundente provee aleantes se aconseja no ser reutilizado. Este proceso puede ser mecanizado o semiautomático, aunque el equipo usado para cada proceso es ligeramente diferente. En el proceso SAW se usa alambre (electrodo) y fundente por separado, motivo por el cual hay numerosas combinaciones posibles para una aplicación específica. Hay dos formas de combinar los alambres y fundentes para proveer un cordón de soldadura aleado; se puede obtener de un electrodo aleado con fundente neutro, o un electrodo de acero dulce con un fundente con aleantes. Los alambres se suministran en carretes de 10 kg a 500 kg y con diámetros de 1,6 mm a 6,4 mm (1/16 in a 3/8 in). Los alambres de acero al carbono se recubren con cobre, excepto los alambres para soldaduras de materiales resistentes a la corrosión (aceros de alta aleación) y en ciertas aplicaciones con alambres tubulares (nucleares). El recubrimiento de cobre evita la corrosión, mejora el contacto eléctrico y disminuye el rozamiento del alambre con el dispositivo alimentador. Los fundentes utilizados en la soldadura por arco sumergido, generalmente están compuestos por óxidos de calcio, aluminio, magnesio, manganeso y silicio, lo mismo que fluoruro de calcio y otros componentes formadores de escoria (SiO_2 , TiO_2 , CaO , MgO , Al_2O_3 , MnO , K_2O , Na_2O , Li_2O , FeO , ZrO_2 y CaF). Entre las principales funciones de los fundentes son: proteger el metal fundido de la interacción con la atmósfera, limpiar y desoxidar la soldadura fundida, además de ayudar a controlar las propiedades químicas y mecánicas del metal de aporte en el cordón de soldadura. Existen dos métodos importantes para elaborar los fundentes que son: granulados o fundidos.

5.7.1. Fundentes granulados (Aglomerado)

Son fabricados mezclando en seco los compuestos del fundente y luego aglomerándolos con silicato líquido, entonces los gránulos del fundente son horneados una temperatura relativamente baja para eliminar el agua del silicato líquido. Este tipo de fundente puede

contener partículas desoxidantes, las cuales pueden favorecer a la buena operación sobre el óxido y las escamas metálicas. Una desventaja notable de este tipo de fundente es su alta capacidad higroscópica, pues mientras están almacenados, son capaces de absorber altas cantidades de humedad sino están apropiadamente aislados y acondicionados. Un procedimiento eficaz para eliminar la humedad, si se sospecha de su existencia, es hornear los paquetes de fundente sin abrirlo, en hornos para electrodos a una temperatura de entre 260 °C y 427 °C, durante un tiempo de 2 horas a 6 horas, lo que remueve toda la humedad existente. En la tabla 5.5 están las ventajas y limitaciones de los fundentes aglomerados para SAW. Muchos operadores prefieren hacer este procedimiento con todos los paquetes de fundente, incluyendo los nuevos, como una forma de asegurar el resultado de sus soldaduras y garantizando así que estén libres de contaminación. La transferencia de Mn de los fundentes granulados es cinco veces mayor a los fundentes fundidos, además tienen una baja densidad aparente y por tal motivo se consume poco fundente durante el proceso de soldadura; se consume 0,9 kg por 1 kg de hilo, mientras que los fundentes fundidos consumen 1,3 kg por 1 kg de hilo. El reciclado es muy problemático por lo que se aconseja una mezcla con un porcentaje máximo del 30 % de fundente usado.

Tabla 5.5. Ventajas y limitaciones de los fundentes aglomerados para SAW (34)

VENTAJAS	LIMITACIONES
<ul style="list-style-type: none"> *Alto poder desoxidante. *Permite añadir elementos de aleación. *Pueden ser totalmente activos. *El consumo de fundente es moderado. *La escoria se elimina fácilmente. *Admite intensidades de 800 A a 1000 A. 	<ul style="list-style-type: none"> *Experimentan cambios de composición química por segregación de sus componentes, por tal motivo, su reciclado es problemático. *Los fundentes básicos son higroscópicos. *Tendencia a absorber humedad y provocar porosidad o fisuración por hidrógeno.

5.7.2. Fundentes fundidos

Son fabricados triturando, calcinando y mezclando los componentes para luego fundirlos en un horno eléctrico a temperaturas entre 1500 °C y 1700 °C, hasta formar un líquido

homogéneo. Este fundente líquido al enfriarse, vuelve a su estado sólido para luego ser triturado hasta lograr la granulometría adecuada. Su ventaja principal es que no es higroscópico debido a su alta dureza, es muy difícil que este material absorba humedad, no obstante alguna humedad podría condensarse en las superficies de los granos, la cual es de fácil manejo, pudiéndose eliminar a una muy baja temperatura, 100 °C por una hora. El proceso de fundición también logra que los componentes se mezclen químicamente uniforme, esto proporciona un rendimiento más homogéneo en la soldadura, incluso a altos niveles de corriente, también permiten una velocidad de avance más alta durante el proceso de soldadura. En la tabla 5.6 están las ventajas y limitaciones de los fundentes fundidos para SAW.

Tabla 5.6. Ventajas y limitaciones de los fundentes fundidos para SAW (34)

VENTAJAS	LIMITACIONES
<ul style="list-style-type: none"> * Buena homogeneidad química, permitiendo el reciclado sin riesgos. * No es higroscópico y se pueden emplear desde su envase original. * Pueden ser totalmente activos. * Permiten la manipulación y almacenaje sin mayores riesgos. * Son resistentes y duran más, ya que no se pulverizan. * Admite altas velocidades de soldeo. 	<ul style="list-style-type: none"> * No contienen ferroaleaciones, ni desoxidantes, por la alta temperatura de fabricación. * La intensidad de corriente que admite está limitada a 800 A. * El consumo de fundente es elevado. * Las propiedades mecánicas del cordón de soldadura son medianas. * La escoria se elimina con cierta dificultad.

Los fundentes también se clasifican, según su efecto en la operación de soldadura; existen dos categorías en este sentido y son los fundentes activos y los fundentes neutros:

Fundentes activos: Los fundentes activos son aquellos que causan un cambio sustancial en la composición química final del metal de soldadura, cuando el voltaje de soldadura (y por consiguiente la cantidad de fundente), es cambiado. Los fundentes en estado fundido, generalmente aportan grandes cantidades de magnesio y silicio al material de aporte,

incrementando la resistencia, pero cuando se usa fundente activo para hacer soldaduras de multipases, puede ocurrir una excesiva acumulación de estos componentes resultando en una soldadura muy vulnerable a las grietas y las fracturas; los fundentes activos deben ser usados limitadamente en las soldaduras con pasos múltiples; un cuidado especial en la regulación del voltaje es recomendado cuando se usa este tipo de fundentes en el procedimiento de soldadura con pasos múltiples para evitar la saturación de magnesio y silicio, en términos generales, no es recomendado el uso de fundentes activos en soldaduras de pases múltiples en láminas de un diámetro superior a los 25 mm.

Fundentes neutros: Este tipo de fundentes no causan cambios significativos en la composición química del metal de aporte, ni siquiera con variaciones de voltaje. Los fundentes neutros no afectan la fuerza de la soldadura, indiferentemente al voltaje o número de pases de soldadura que se apliquen. Como regla general, los fundentes neutros deben ser parte de las especificaciones de las soldaduras con pases múltiples. Cuando se esté empleando fundentes con granulometría muy fina es necesario poner mucha atención al sistema de alimentación y de recuperación de fundente, ya que cuando está siendo aspirado el fundente, el sistema de vacío del equipo puede segregar las partículas más finas, conllevando a que sólo se recirculen las partículas más gruesas, cambiando la composición química del cordón de soldadura. Cuando se elija un fundente de bajo contenido de hidrógeno se debe mantener seco y se debe seguir las recomendaciones del fabricante del fundente para los procedimientos de secado. Cuando el fundente aporte elementos de aleación es necesario mantener constante la relación entre el electrodo que se funde y la cantidad de fundente que se alimenta al charco de soldadura. Esta relación está determinada en la calificación del procedimiento de soldadura. La *American Welding Society* identifica por separado a los electrodos y los fundentes para el proceso SAW de la siguiente manera:

F X X X - E XXX

(1) (2) (3) (4) (5) (6)

(1) La letra F lo identifican como fundente.

- (2) El primer dígito se refiere a la resistencia a la fluencia multiplicada por 10000 psi, en combinación con el electrodo designado a continuación.
- (3) El siguiente número designa la condición del tratamiento térmico (A) para cuando no se necesita tratamiento térmico y (P) cuando se necesita tratamiento térmico postsoldadura.
- (4) El siguiente número indica la temperatura mínima en donde el ensayo de resistencia al impacto en el cordón de soldadura alcanza o supera los 27J (20 ft/lb).
- (5) La letra E lo identifican como electrodo sólido; cuando aparezca EC indica que es un electrodo tubular de material compuesto.
- (6) Los siguientes números dan la clasificación del electrodo para producir la soldadura referenciada en unión con el fundente.

Para electrodos EL XX, EM XX y EH XX, la E es de electrodo, la L de (*Low*) bajo contenido de manganeso; la M de mediano contenido de manganeso y la H de (*High*) alto contenido de manganeso. Cuando al final tenga la letra K (E XX K) indica que el electrodo tiene tratamiento térmico en su fabricación.

Ejemplos:

F7A6-EM12K: Es un fundente que en unión con el electrodo EM12K produce cordones de soldadura que tendrán una resistencia a la tensión de 70000 psi y no necesitan tratamiento térmico, además tiene una resistencia al impacto Charpy mayor o igual a 27 J (20 ft/lb) a -60 °F (-51°C).

F7A4-EC1: Es un fundente que en unión con el electrodo EC1 produce cordones de soldadura que tendrán una resistencia a la tensión de 70000 psi y no necesitan tratamiento térmico, además tiene una resistencia al impacto Charpy mayor o igual a 27 J (20 ft/lb) a -40 °F (-40 °C).

6. ROCIADO TÉRMICO

El rociado térmico es un proceso para añadir a una pieza, capas del mismo material o de materiales diferentes, para la creación de recubrimientos superficiales que soporten el desgaste y la corrosión. Este tratamiento superficial no afecta el metal base sobre el cual se deposita y la combinación resultante puede tener mejores propiedades físicas, químicas o costos más económicos que los de un metal o aleación uniforme. Hoy en día, los progresos del rociado térmico tienen una gran aceptación en la industria, tanto en la fabricación de piezas como en el mantenimiento, dado que el campo de aplicación se extiende y amplía cada vez más debido al desarrollo de nuevas aleaciones y procesos. Cada una de las aleaciones de metales en polvo es un compuesto especializado que permite lograr altos niveles de rendimiento. El tamaño controlado de las partículas de cada aleación asegura una alta eficiencia del rociado térmico. Los beneficios en productividad que se derivan de las aleaciones están en proporción directa con los procedimientos de control que se siguen durante la mezcla o la elaboración de las aleaciones. Mientras mayor sea el número de criterios de evaluación, más confiable y predecible será el rendimiento (49, 50). La confiabilidad y la eficiencia de las capas hace necesario que estas capas de recubrimiento estén bien seleccionadas y aplicadas correctamente, para un funcionamiento exitoso (49).

En las últimas décadas el proceso del rociado térmico ha tenido un amplio desarrollo y reconocimiento a nivel industrial en países desarrollados, debido a los grandes avances de los nuevos materiales para la elaboración de nuevos revestimientos y nuevas aplicaciones. Para obtener los resultados esperados del revestimiento por rociado térmico, se requiere conocer muy bien el proceso, en especial las variables que afectan las propiedades finales del recubrimiento y por consiguiente, su desempeño en una aplicación específica. Esta tecnología es ampliamente usada en la industria militar, electrónica, aeroespacial, aviación, petroquímica, turbinas a gas y en la bioingeniería, entre otras. Las aplicaciones típicas incluyen fabricación de componentes, preparación y protección de superficies, recuperación de piezas desgastadas en servicio, etc.; además el rociado térmico está ganando espacio en

la ingeniería de producción por sus grandes ventajas y cada vez se desarrollan nuevos revestimientos para aplicaciones de alta tecnología, ya que reduce los costos del uso de los materiales avanzados y aumenta el ciclo de vida de los sistemas de alto desempeño, lo que produce un aumento de la productividad de las industrias (49, 51, 52). Para la aplicación de las capas rociadas térmicamente se usa una antorcha (pistola) para calentar un material, en forma de polvo o de alambre, a un estado fundido o semi-fundido y el uso de un gas para propulsar el material de aporte hacia el sustrato, creando una superficie totalmente nueva. El material de la capa puede ser un solo elemento, una aleación o compuestos con características físicas y químicas únicas, que en la mayoría de los casos, sólo son alcanzables con el proceso de rociado térmico. Las capas rociadas térmicamente son un método altamente rentable y sirve para agregar características y calidades superiores de funcionamiento a una superficie dada. La variedad de productos y capas que se pueden obtener por rociado térmico son virtualmente ilimitadas. Las capas pueden ser metálicas, cerámicas, poliméricas o de cualquier combinación deseada para dar un amplio rango de características físicas. El principio de funcionamiento puede ser observado en la figura 6.1, donde se muestra el uso de polvos como material de alimentación (49).

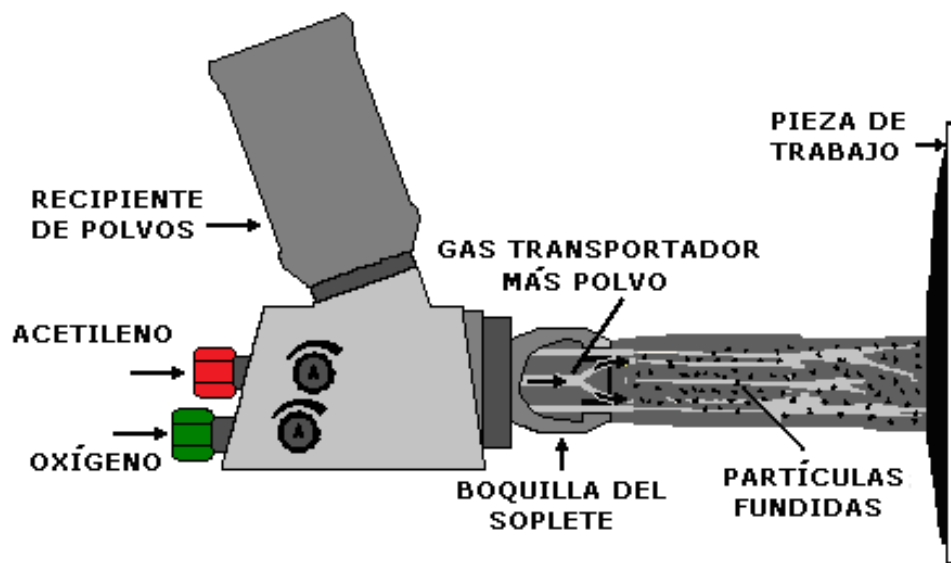


Figura 6.1. Esquema del rociado térmico por llama con polvos (49, 53)

Las técnicas de rociado térmico se han empleado desde hace un poco más de un siglo, cuando el ingeniero suizo Max Ulrich Schoop de Zúrich-Suiza en 1902, lo usó para recubrir

superficies metálicas sin el uso de adhesivos o inmersión. El primer proceso empleaba metal fundido, el cual se vertía en un recipiente y se hacía pasar por un pequeño inyector, rodeado por un orificio anular a través del cual el aire comprimido u otro gas era alimentado, pero antes este aire o gas era calentado al pasar a través de una serpentina tubular. La corriente de gas divide el metal fundido en pequeñas partículas en forma de spray y como la presión del gas es alta, cada partícula viaja hacia el substrato, previamente preparado para recibirlo, a alta velocidad. Si la gota golpea la superficie mientras está fundida, ésta se adherirá y formará un sólo miembro entre el substrato y el depósito. El proceso de rociado térmico fue originalmente conocido como rociado por llama o metalización. El primer uso práctico experimental del proceso fue hecho en Francia y Alemania durante Primera Guerra Mundial; pero el desarrollo comercial a una escala considerable, ocurrió solamente en Inglaterra en los inicios de los años 1920's. El proceso de rociado térmico se vuelve importante durante y después de la segunda guerra mundial, cuando la producción de materias primas fue muy baja y el reaprovechamiento de piezas y componentes era de gran importancia para la reparación de tanques y componentes de aeronaves (49). El uso de revestimientos cerámicos duros sobre componentes, como en el caso de extrusoras de tubos plásticos, fabricados en acero inoxidable, es de gran importancia y versatilidad en la recuperación de piezas o en el aumento de la vida útil de estos componentes y equipos. Se han realizado aplicaciones de revestimientos por rociado térmico por plasma, en válvulas de esferas para servicio pesado, en la industria minera de oro y en plantas de remoción de dióxido de carbono y en la extracción de petróleo, con óptimo desempeño en ambientes altamente erosivos o corrosivos. La aplicación de revestimientos de zinc y/o aluminio, por rociado térmico, en puentes, para la protección contra la corrosión atmosférica y/o marítima, presenta una ventaja económica. A pesar de que los costos iniciales de la aplicación de estos revestimientos son altos, aproximadamente 1,5 veces mayor que los de sistemas de pintura de alto desempeño, los respectivos costos del ciclo de vida son menos de tres cuartos de los costos de sistemas de pintura, justificando su uso. Debido al crecimiento inminente de la industria del rociado térmico, este irá a demandar mayor inversión en entrenamiento del personal que trabaja en esta área, además del patronado y certificación de los procesos y procedimientos de aplicación de los

revestimientos, para obtener recubrimientos de alta calidad, para que los usuarios queden satisfechos y puedan confiar en estos procesos y se generen, cada vez más, nuevas aplicaciones para estos recubrimientos, ya que el rociado térmico es una forma altamente rentable de agregar características a un determinado sustrato para un óptimo funcionamiento. Como los recubrimientos pueden ser metálicos, cerámicos, poliméricos o cualquier combinación que se necesite, se puede obtener un amplio rango de características, en el cual las variaciones y aplicaciones de esta tecnología son virtualmente ilimitadas (49, 50, 54, 55).

6.1. Terminología del rociado térmico

En términos muy simples, el recubrimiento rociado térmicamente comprende el calentamiento del material, en forma de polvo o de alambre, hasta obtener una forma fundida o semi-fundida. Este material se transporta mediante una corriente de gas o de aire comprimido para su depósito, creando una estructura en la superficie en un determinado sustrato, dándole características apropiadas al uso que se le va a dar. Este proceso es de naturaleza sinérgica, ya que las diversas variables operacionales y componentes usados producen un efecto mayor cuando actúan juntos, que cuando son considerados individualmente. En todos estos procesos se emplea una fuente generadora de calor y un material de aporte que se alimenta en forma de alambre o de polvo. Con la ayuda de esta fuente de calor, el material de aporte que se alimenta se funde y se proyecta sobre la superficie previamente preparada, en donde estas partículas chocan con la superficie del sustrato, aplanándose y formando finas partículas lenticulares que se solidifican, conformándose y adhiriéndose a las irregularidades de la superficie y entre sí, formando una estructura laminar. En los procesos de rociado térmico ocurren dos etapas distintas: atomización y deposición. En la atomización tiene lugar la formación de gólicas del material líquido fundido y en la deposición se presentan dos momentos distintos: el primero donde la gota está viajando e interactúa con el gas de atomización y el segundo donde las gólicas impactan e interactúan con el sustrato. La figura 6.2, ilustra esquemáticamente, la sección transversal de un revestimiento rociado térmicamente (49, 50, 56).

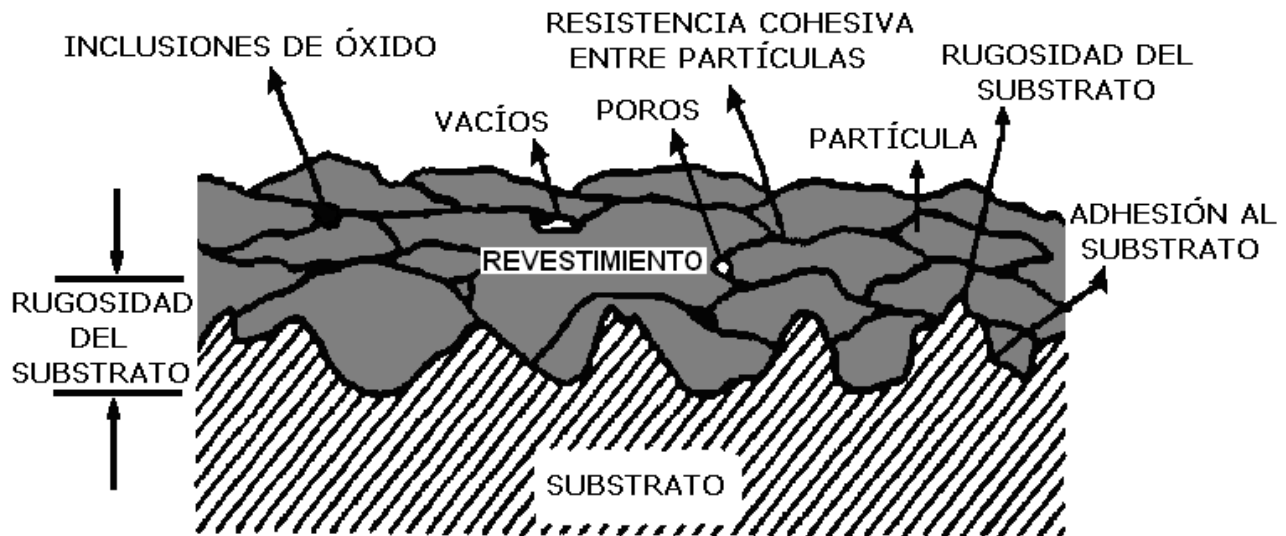


Figura 6.2. Sección transversal típica de un revestimiento rociado, mostrando la estructura laminar de óxidos e inclusiones (49, 50, 56)

La unión entre el depósito rociado térmicamente y el sustrato puede ser mecánica, metalúrgica, química, física o una combinación de estas formas. La adhesión es influenciada por una serie de factores tales como: el material del revestimiento, estado del sustrato, grado de rugosidad de la superficie, limpieza, temperatura de la superficie antes, durante y después de la aspersión y velocidad de impacto de las partículas. Las variaciones básicas del proceso de rociado térmico ocurren en los materiales utilizados para la aspersión, en el método de calentamiento y en el método de propulsión de los materiales hacia el sustrato. Diversos metales, cerámicas, compuestos intermetálicos, algunos polímeros y ciertos vidrios pueden ser depositados por uno o más de los procesos de rociado térmico. La utilización de los diferentes procesos de rociado térmico no compiten entre sí, sino que se complementan, gracias a sus características específicas e individuales (49, 57). La preparación del sustrato antes de la aspersión es muy importante para este proceso. Los pasos más importantes son la limpieza de la superficie, para eliminar la contaminación que disminuirá la adherencia del revestimiento al sustrato y el mantenimiento de la rugosidad superficial, para proveer irregularidades que permitirán la adhesión del revestimiento y crear una mayor área superficial efectiva. La adecuada

preparación del sustrato, antes de la aplicación del revestimiento, es la etapa más crítica que influye en la resistencia de la unión y la adhesión del revestimiento al sustrato (49).

6.2. Procesos de rociado térmico

Todos los procesos de rociado térmico requieren dos tipos de energía, la energía térmica y la energía cinética. La energía térmica es necesaria para fundir el material de recarga y la energía cinética es para aplicar el material, gracias a la velocidad impartida a las partículas. Estas variables influyen en la adhesión y cohesión del material del revestimiento, como también en sus propiedades mecánicas. La energía cinética varía mucho entre los diferentes procesos de rociado térmico y además depende del material del recubrimiento y del tamaño de las partículas. El material a proyectar en forma de polvo, alambre o varilla, es fundido mediante energía calórica obtenida a partir de la combustión de gases, la formación de un arco eléctrico o de una recombinación de gases plasmógenos, según el procedimiento empleado. Las técnicas de rociado térmico que utilizan sistemas de combustión son: por combustión de llama, oxi-combustible de alta velocidad (HVOF) y detonación. Los sistemas que utilizan el arco eléctrico son: arco eléctrico y arco eléctrico con propulsión y los sistemas de plasma son: con arco transferido (PSP) y no transferido (PTA). El primer sistema utiliza la combustión de gases como fuente de calor. El segundo sistema utiliza energía eléctrica como fuente de calor y el tercer sistema utiliza energía eléctrica para generar el plasma, que a su vez, es la fuente de calor (49).

6.2.1. Sistemas de rociado térmico por combustión

Estos procesos utilizan la energía química de una llama de oxi-combustible como fuente de calor, para fundir los materiales del revestimiento en forma de polvo o alambre; estos materiales pueden ser metálicos o no metálicos, con puntos de fusión menores a 2000 °C. Además, este grupo puede ser subdividido en: combustión por llama convencional, oxi-combustible de alta velocidad (HVOF) y detonación (49).

6.2.1.1. Rociado térmico por combustión de llama convencional

En este proceso de rociado térmico, el material de aporte se va fundiendo de forma continua en una llama de gas combustible y oxígeno, y con la ayuda de los gases de combustión en expansión, se proyecta el material fundido o plastificado sobre la superficie de la pieza a tratar; en ocasiones se utiliza un gas adicional como argón o nitrógeno para proyectar las partículas fundidas. Este proceso produce revestimientos porosos y con limitaciones de adherencia, a cambio de ello, es el equipo más barato del mercado. Las antorchas de aspersión por llama, pueden ser adaptadas para usar diversas combinaciones de gases, con el fin de obtener una optimización de los costos y la calidad del revestimiento. Los gases combustibles usados son acetileno, hidrógeno, propano y propadieno, y como gas pulverizador el oxígeno, aire, nitrógeno o argón. El acetileno es el gas más utilizado debido a que se obtienen temperaturas más altas, además de tener bajo costo. Los materiales de aporte pueden estar en forma de polvo, alambre o varilla, y en algunos equipos, con el cambio de boquilla y de la tapa de aire (*air cap*), se puede adaptar la antorcha para las diferentes aleaciones, tamaño de alambre y gases (49, 54, 58). El ajuste de la llama neutra es particularmente importante, si se pretende conseguir capas de recubrimiento con bajos porcentajes de óxidos. La llama neutra de acetileno /oxígeno, se consigue con una proporción de 1:1,15. Cuando la llama tiene más acetileno es una llama reductora y si la llama tiene más oxígeno es una llama oxidante. El efecto reductor de la llama es ventajoso cuando se aplican polvos autofundentes. La temperatura de la llama está entre 2700 °C y 3100 °C y la velocidad de las partículas entre 40 m/s y 100 m/s (49).

La aleación en polvo se inyecta a temperatura ambiente, en donde la aleación micro pulverizada y la llama acetilénica tienen la misma trayectoria, lo que da origen a una transferencia de calor de la llama a la partícula, por lo tanto, la partícula es calentada, elevando sucesivamente su temperatura hasta plastificarla; en algunos casos, la partícula permanecerá el tiempo suficiente en la llama como para ser fundida. Además de elevar el nivel de energía térmica de la partícula; dicha partícula es fuertemente acelerada por la expansión de los gases de combustión, incrementando la energía cinética. Este haz de

partículas plastificadas y/o fundidas que tienen altas velocidades, impactan sobre la superficie de la pieza ante lo cual las partículas se deforman, adaptándose a la rugosidad de la pieza que ha sido preparada y por lo tanto se entrelazan mecánicamente. En muchos casos poseen suficiente energía, tanto térmica como cinética, para producir una difusión metalúrgica con el metal base, produciéndose a lo largo de la interfase metal base-recubrimiento, una red continua de micro soldaduras, en donde la adhesión de los recubrimientos por rociado térmico, es atribuible al entrelazado mecánico de las partículas y a una difusión localizada (49). La eficiencia en la transferencia del calor de la llama a la partícula dependerá del tamaño y la forma de esta. Un tiempo demasiado largo implicará excesiva transferencia de calor, oxidando las partículas, las cuales serán depositadas en forma de óxidos; tanto el tamaño como la forma de la partícula son variables que pueden ser controladas mediante el proceso de fabricación adecuado y constituyen los parámetros más importantes que determinan la calidad de una aleación micro pulverizada. La partícula debe tener un diámetro nominal preestablecido para el tipo de sistema que se va a usar. Para un sistema de alto poder calorífico una partícula de diámetro nominal inferior al requerido, implicará una excesiva transferencia de calor por unidad de área superficial, produciéndose oxidación por alta temperatura. Por el contrario, partículas de diámetro nominal mayor al requerido no absorberán suficiente calor y no lograrán plastificarse, menos aún fundirse, impidiendo el entrelazado mecánico. La figura 6.3, muestra una antorcha de aspersion por llama de polvo (49).

La desventaja del sistema del polvo es que no es muy conveniente para los metales de alto punto de fusión y las pérdidas de material son más altas que con el alambre, porque no se funden todas las partículas. Con este método que puede ser portátil, el material en polvo es alimentado en la antorcha proveniente de un recipiente, el cual puede ser separado de ésta o colocado sobre la misma. El polvo puede ser aspirado o transportado hacia la llama por un sistema de alimentación por aire, por el flujo de oxígeno o por gravedad. En las antorchas más antiguas, la inyección del polvo es realizada verticalmente al eje de la antorcha, por gravedad. En las antorchas más modernas, la inyección es axial y utiliza alimentadores de polvo remotos. El polvo es fundido por la llama e impulsado sobre el substrato por el

chorro de aire comprimido o por los gases de combustión, como se ilustra en las figuras 6.1 y 6.3. La velocidad de alimentación del polvo varía de 50 g/min a 100 g/min, y la velocidad de flujo del gas de transporte varía de 3 l/min a 5 l/min (49, 56).

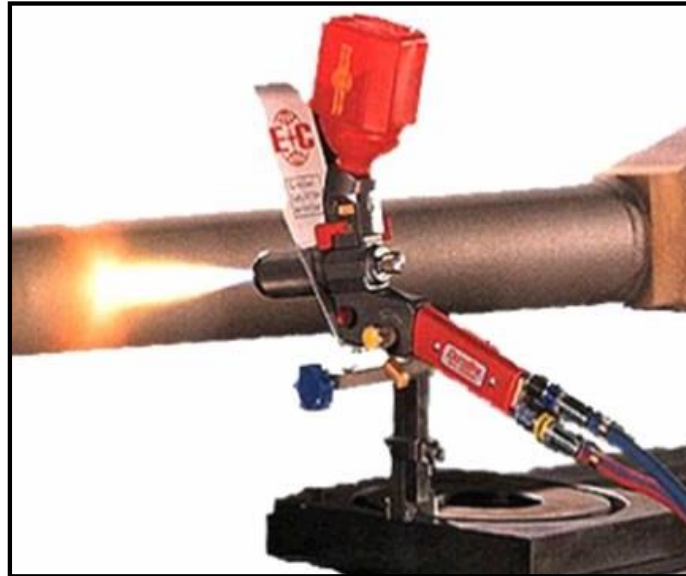


Figura 6.3. Antorcha de aspersión por llama de polvo (49, 50)

Debido a las bajas velocidades de partículas y temperaturas obtenidas por este proceso, los revestimientos producidos tienen, generalmente más baja resistencia adhesiva y cohesiva y una porosidad más alta que los revestimientos producidos por otros procesos. El polvo de alimentación puede ser un metal puro, una aleación, un compuesto, una cerámica, un carburo, o cualquier combinación de estos. El avance en la calidad y la variedad de polvos está contribuyendo perceptiblemente al adelanto de la tecnología del rociado térmico. Los nuevos procesos que se están utilizando para producir económicamente las aleaciones especiales y formulaciones de cerámica (carburos cementados de cromo y tungsteno), dan tamaños y distribuciones de partículas más uniformes y en formas esféricas, por tal motivo, hay uniformidad en el calentamiento de la partícula, lo que genera depósitos más compactos, con mayor adherencia y menos porosos (49). En el proceso de rociado térmico por medio de alambre, éste es alimentado por el orificio central de un inyector que se asemeja a la pistola de polvo. La alimentación del alambre puede variar entre 80 g/min a 650 g/min y se debe sincronizar exactamente con la velocidad de fusión del metal (49, 54, 59). Las pistolas de este proceso pesan entre 1,4 kg a 1,8 kg y se pueden manejar sin

dificultad. La desventaja de este proceso es que es aplicable solamente a metales bastante dúctiles que puedan ser producidos en forma de alambre. Es esencial, que el mecanismo de alimentación en la pistola sea mantenido con buena limpieza. Algunas pistolas modernas también tienen controladores automáticos incorporados, de modo que la velocidad del alambre permanezca constante. La antorcha con la que se aplican varillas y principalmente varillas cerámicas, tiene algunas variaciones en la boquilla del gas, la tapa de aire y en el sistema de alimentación. Se debe tener cuidado con el ajuste de los parámetros del proceso, debido a los altos puntos de fusión y las bajas conductividades térmicas de los materiales cerámicos, comparados con los metálicos (49, 50). La figura 6.4, muestra la sección transversal de las antorchas de aspersión por llama de alambre.

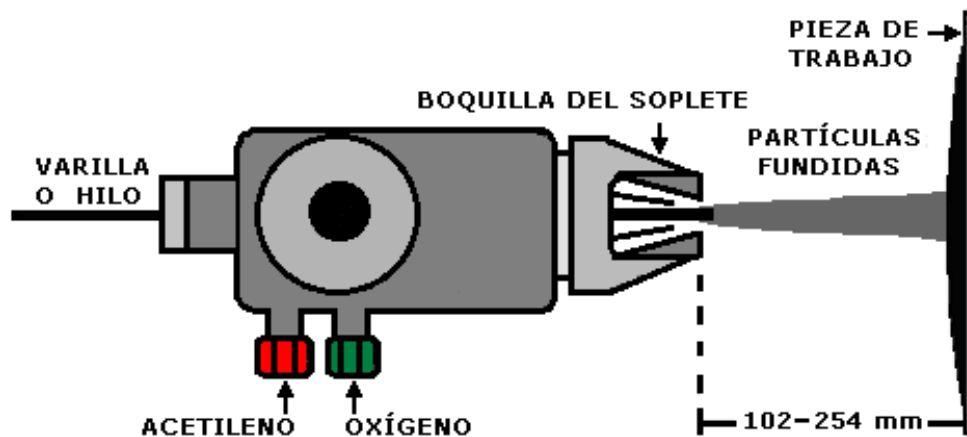


Figura 6.4. Esquema de la antorcha de aspersión por llama de alambre (49, 53)

6.2.1.1.1. Revestimientos con polvo fusibles o autofusibles

En la aplicación de revestimientos de aleaciones auto fusibles, estas cuentan con elementos de aleación que reaccionan con el oxígeno u óxidos para formar óxidos de baja densidad que flotan sobre la superficie, mejorando la densidad y la adherencia, entre otras propiedades. Estos materiales son a base de níquel (Ni) o cobalto (Co), los cuales pueden tener adiciones de boro, fósforo o silicio (generalmente menos del 5 %), que sirven como agentes fusibles para bajar el punto de fusión de la aleación. El níquel y el cromo pueden formar carburos que actúan contra el desgaste, ya que estos carburos quedan inmersos en la matriz metálica. Como estas aleaciones tienen bajos puntos de fusión, algunas veces

requieren de un tratamiento térmico después de la aspersión (49). Todas las aleaciones autofusibles tienen amplios rangos de fusión y exhiben un comportamiento bien viscoso en su estado parcialmente fundido. El control apropiado del aporte de calor y tiempo durante la fusión es crítico, pudiendo surgir problemas como grietas debido a la diferencia de expansión térmica, contracción, vacíos, distorsión y disolución del metal base. En la fusión, el depósito del rociado es calentado, hasta cuando la superficie alcanza una apariencia altamente reflexiva y vítrea. Esto proporciona una combinación óptima de fusión de la partícula, cierre de vacíos interpartículas y flujo de óxidos. La microestructura del revestimiento, después de la fusión, presenta una respuesta del material bien diferente de aquella en la condición de “rociado térmico” (49, 50, 56). La distancia de aspersión varía normalmente entre 120 a 250 mm, siendo esta la distancia entre la extremidad de la antorcha y el substrato. El ángulo de aplicación es de 90 grados o llama perpendicular al substrato, lo cual puede ser alterado en función de la forma del substrato. La atmósfera de aplicación de estos revestimientos es por lo general aire. La porosidad está entre el 10 % y 20 %, pudiendo ser prácticamente mucho menor (menos del 2 %) para los revestimientos autofusibles. Los espesores de aplicación típicos están entre (0,1 mm a 2,5 mm). El mayor inconveniente en el uso de las aleaciones fusibles, es el calentamiento que requiere para el proceso de fusión, ya que este puede causar distorsión en la pieza, peor aún, puede afectar las propiedades mecánicas y metalúrgicas del material base. Este punto es muy importante para aceros especiales y se deben tomar todas las precauciones necesarias para no afectar sus propiedades (49, 54, 56, 60).

➤ **Proceso de rociado térmico en dos etapas (aspersión y fusión)**

El primer paso para la deposición en dos etapas es la aspersión del polvo en el lugar; durante esta etapa, el polvo alcanza su temperatura de fusión, ablandándose y deformándose antes del impacto, pero el revestimiento aún permanece con un alto grado de vacíos inter partículas; un segundo paso es la fusión del revestimiento con llama, bobinas de inducción, hornos al vacío, entre otros, para densificar (aumentar la densidad) el revestimiento eliminando la mayoría de los poros, además de aumentar la adherencia del

revestimiento. El mojado y la coalescencia de los polvos depositados son realizados a través de la fusión de los óxidos en la superficie del sustrato. La fusión es requerida como un postratamiento en el rociado térmico con la mayoría de las aleaciones duras autofusibles. Por otro lado, este proceso es limitado por la geometría de la pieza, debido esencialmente a la necesidad de producir una fusión superficial a una temperatura entre 950 °C y 1050 °C (49, 57).

➤ **Proceso de rociado térmico en una etapa (aspersión-fusión simultánea)**

Este proceso consiste en la proyección y fusión simultánea de la aleación, esto se logra debido al reducido tamaño de la partícula. La pieza y/o área a recubrir debe ser pequeña, estar precalentada, y la distancia boquilla-pieza deberá ser menor que en el proceso de dos etapas. Estas aleaciones contienen boro y silicio entre 1,5 % – 5,0 %, que actúan como fundentes en la aleación, desoxidando los demás elementos como Fe, Cr, Al, entre otros. Con este proceso se obtienen capas densas y sin poros, con alta adherencia al sustrato, más de 70 MPa, por lo cual se utilizan para combatir el desgaste, ya que pueden soportar impacto y cizallado moderado (49, 50, 56). Para no agotar por sobre calentamiento el contenido de boro y silicio de estas aleaciones, se debe desplazar la antorcha en forma simultánea en la zona a recubrir, a fin de no elevar puntualmente la temperatura del depósito/metal base. La temperatura de la pieza rociada es gradual y uniformemente llevada a un color rojo mate (760 °C - 870 °C), luego se eleva progresivamente la temperatura y se aplica el revestimiento, hasta llegar a los rangos de fusión, concentrando el calor en una banda delgada de revestimiento. La antorcha debe estar en movimiento permanente (atrás-adelante), en toda la zona de la pieza a recubrir y se fija en la banda de fusión para avanzar con el revestimiento en estado líquido y después se continúa con otra banda. La velocidad de avance y retroceso de la antorcha debe ser aquella que pueda calentar la pieza en forma gradual, pero evitando que el revestimiento se desborde o deforme. En la fusión del depósito, la superficie adquiere una apariencia vitrificada muy reflectiva. El sobre calentamiento dará una fase líquida que induce vacíos por la contracción, además de distorsiones, retracción del depósito y excesiva dilución con el metal base (49, 61).

6.2.1.2. Oxi-combustible de alta velocidad – HVOF

El proceso Oxi-combustible de alta velocidad (**HVOF**), utiliza alta energía cinética con una controlada energía térmica, para producir recubrimientos densos de baja porosidad, con bajos esfuerzos residuales y adherencias que superan los 13000 psi. Estos recubrimientos producen muy bajos efectos de esfuerzos residuales permitiendo espesores bastante altos. El proceso de aspersión HVOF (*High Velocity Oxi-Fuel*), tiene una alta calidad del revestimiento y tensiones residuales reducidas, otras ventajas incluyen eficiencia del depósito, menor sensibilidad al ángulo de aspersión y menos variables críticas del proceso. En este proceso, se utiliza una mezcla de gas combustible con oxígeno de alta presión, que es quemado, generando un chorro de alta velocidad. Dependiendo de los requerimientos del usuario el combustible, puede ser propano, propileno, metil-acetileno-propadieno o hidrógeno. El material en forma de polvo es introducido axialmente y en algunos casos radialmente en el cabezal utilizando nitrógeno como gas conductor. El combustible mezclado con el oxígeno es inyectado en la boquilla y encendido, siendo los productos de combustión liberados y expandidos a través de la boquilla, donde la velocidad del gas puede hacerse supersónica (5 Mach). En la antorcha, la cámara de combustión y la boquilla son refrigeradas por agua (49). La figura 6.5, muestra esquemáticamente, una antorcha HVOF.

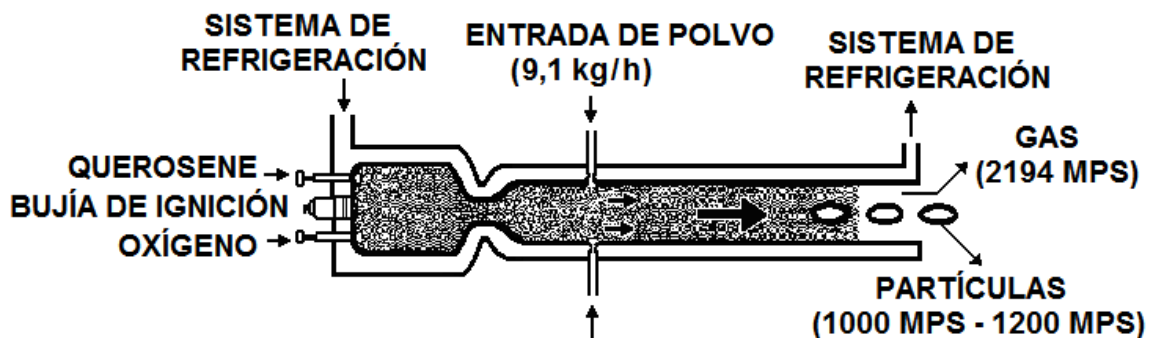


Figura 6.5. Esquema de una antorcha de rociado térmico por oxi-combustible de alta velocidad (HVOF) (49, 50)

En el proceso HVOF se lleva a cabo una expansión muy rápida a través de la boquilla de restricción, en donde los gases alcanzan velocidades entre 1500 m/s y 2000 m/s y las

partículas fundidas alcanzan velocidades entre 550 m/s y 800 m/s. La alta aceleración de los gases ha demostrado un incremento en la densidad de los revestimientos, en la adhesión y una fina distribución de los óxidos en el revestimiento y un bajo esfuerzo residual. Se puede tener revestimientos con grandes espesores, con baja porosidad, bajo contenido de óxidos y alta adherencia del revestimiento. Un inconveniente de este proceso es su baja energía térmica, ya que la temperatura de la llama está entre 2500 °C y 3100 °C, siendo difícil el rociado térmico de los materiales cerámicos y algunos metales refractarios, pero se obtienen capas finas con gran precisión en la tolerancia. La mayoría de los polvos rociados por este proceso son carburos de tungsteno y cromo. En el mercado hay equipos que pueden usar querosene líquido como combustible y aire; en los sistemas que utilizan querosene se obtienen presiones más altas de combustión y mayores velocidades de partículas que los otros sistemas HVOF. El tamaño de las partículas de polvo que se utilizan en el proceso Oxi-combustible de alta velocidad está entre 5 μm a 45 μm . La velocidad de alimentación de los polvos varía entre 2,3 kg/h y 14 kg/h. La distancia de aspersión varía en la franja de 120 mm a 300 mm. El flujo del gas combustible están entre 40 l/min y 60 l/min y el flujo de oxígeno es mucho mayor hasta 430 l/min. El nivel de ruido en el proceso es alto, excediendo los 140 decibeles (49, 50, 55, 61). En la figura 6.6, se puede observar una antorcha real, de un sistema de alta presión HVOF.



Figura 6.6. Antorcha de aspersión HVOF (49, 59)

Una innovación del proceso HVOF, es el sistema aire - combustible de alta velocidad, llamado HVAF (*High Velocity Air Fuel*), donde el aire, en vez de oxígeno, sostiene la combustión, en unión a un combustible líquido, además, este mismo flujo de aire es usado para refrigerar la antorcha, en vez de agua. El resultado son revestimientos de alta calidad, con una marcada mejoría en el factor económico del proceso, ya que se reducen los costos. Otra innovación del proceso HVOF es el forjamiento por impacto a velocidad hipersónica, llamado HVIF (*Hypersonic Velocity Impact Forging*), donde la temperatura de los gases de combustión expandidos es mantenida baja para evitar la fusión de cualquiera de las pequeñas partículas de polvo alimentado. La conversión de la energía cinética por calor en el impacto permite la fusión del revestimiento sólo en este momento, dando como resultado baja porosidad y mínima cantidad de óxidos aprisionados en el revestimiento (49, 50, 54).

6.2.1.3. Rociado térmico por detonación (D-Gun)

El rociado térmico por detonación es un proceso de aplicación intermitente que utiliza la energía de la explosión de mezclas oxígeno-acetileno para calentar e impulsar los materiales en polvo hacia la superficie del sustrato a ser revestido. El depósito resultante es extremadamente duro, denso y con alta adherencia al sustrato. El cañón de detonación consta de un tubo largo, en cuyo extremo interior se encuentra la cámara de combustión y es allí donde se introduce una mezcla de oxígeno, gas combustible (acetileno) y el material de revestimiento en polvo que se hace detonar. Hecha la ignición de la mezcla de gases, a través de una chispa eléctrica apropiada, una onda de detonación controlada, de alta presión y alta temperatura, acelera y calienta las partículas de polvo mientras las expulsan del tubo de la antorcha, dirigiéndolas sobre la superficie preparada de la pieza. El acetileno, por su gran velocidad de encendido y su alta temperatura de llama, es el gas combustible más utilizado. Las temperaturas alcanzadas dentro de la antorcha son del orden de 3100 °C, mientras que en el sustrato sólo se alcanzan los 150 °C. La velocidad de salida de las partículas está alrededor de 760 m/seg. Este proceso es cíclico y después de cada detonación tiene lugar un barrido de limpieza de la cámara de combustión y del tubo, usando nitrógeno. Se realizan múltiples detonaciones por segundo, hasta 10 veces por

segundo. La uniformidad en el espesor del revestimiento y el nivel de calidad de las capas de recubrimiento, justifica en muchos casos, el mayor costo de la aplicación. El revestimiento consiste en múltiples capas densamente empaquetadas con partículas lenticulares delgadas, que están altamente unidas a la superficie, generando revestimientos de espesor uniforme, lisos y con una superficie plana (49, 50, 55, 62). Un esquema de la antorcha de detonación es presentado en la figura 6.7.

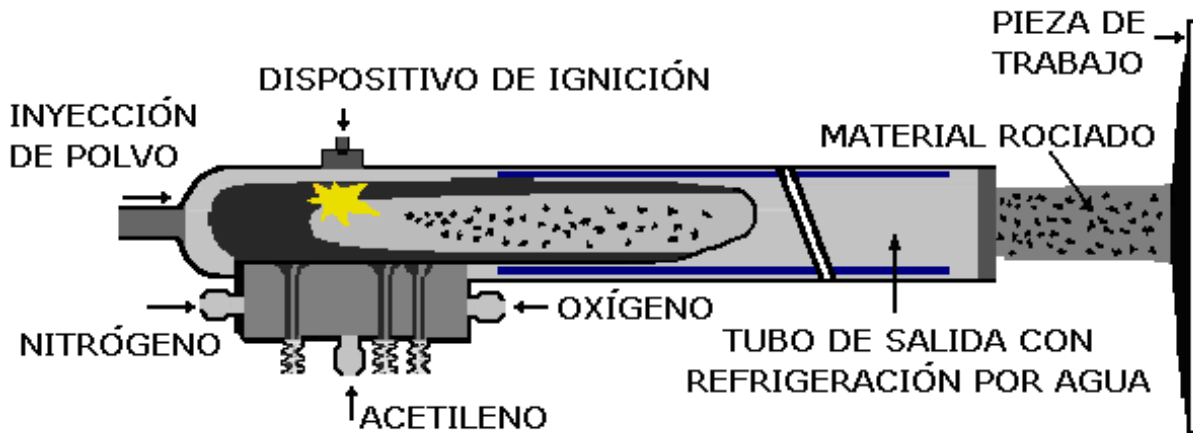


Figura 6.7. Esquema de una antorcha de aspersión por detonación (49, 53)

Este proceso produce un nivel de ruido por encima de 150 decibeles, por tal motivo se debe realizar en un ambiente con aislamiento acústico. La operación de este equipo, es completamente automatizada y controlada remotamente. El bajo nivel de porosidad permite óptimos trabajos de acabado por rectificado. Prácticamente todo material metálico, cerámico o metal-cerámico puede ser depositado por este proceso. Algunos materiales aplicados por este proceso son alúmina, alúmina-titanio, carburo de cromo, carburo de tungsteno y aleaciones. Típicamente, los espesores de estos revestimientos están entre 0,05 mm a 0,50 mm, pero se pueden obtener revestimientos más finos o más gruesos, dependiendo de la aplicación específica. Las mejores propiedades de estos revestimientos son alcanzadas con ángulos de deposición cercanos a los 90° con la superficie y sus propiedades se degradan cuando se realizan deposiciones con ángulos menores de 60° , aunque ciertas aplicaciones requieren ser realizadas con ángulos de 45° . La rugosidad media Ra, de la superficie del revestimiento está entre $2,5 \mu\text{m}$ y $5,0 \mu\text{m}$. La adherencia del revestimiento al sustrato en este proceso es mayor a 70 MPa, además la porosidad es muy

baja, menos del 2 %. Lo anterior es debido a las altas velocidades de las partículas, lo cual hace que los revestimientos sean depositados con esfuerzos residuales de compresión, en vez de esfuerzos residuales a tensión que son típicos de la mayoría de los procesos de rociado térmico (49).

6.2.2. Procesos de rociado térmico por arco eléctrico

En estos procesos el material de aporte (pulverizado) se funde (y se atomiza si es alambre), en una fuente confinada de calor y adquiere velocidad para establecer un chorro, cuyas partículas forman una capa sobre la superficie. Estos procesos producen una alta eficiencia de deposición, buena adherencia y tiene un costo de operación relativamente bajo. Las formas industrialmente más empleadas son las que consiguen recubrimientos con alta adherencia y bajas porosidades, obteniendo capas densas (49).

6.2.2.1. Rociado térmico por arco eléctrico

El proceso de rociado térmico por arco eléctrico, utiliza un arco voltaico para el calentamiento y la fusión de dos electrodos consumibles de alambre, cargados eléctricamente con cargas opuestas (un alambre es positivo “ánodo”, el otro negativo “cátodo”), que se encuentran inicialmente aislados uno del otro, siendo alimentados conjuntamente y avanzan automáticamente para encontrarse en un punto, en una niebla de gas atomizante, donde una diferencia de potencial entre 18 V y 40 V, es aplicada a través de los alambres, iniciando un arco eléctrico controlado en su intersección, que funde y pulveriza las puntas de los alambres que funcionan como electrodos. Un gas, usualmente aire comprimido, es dirigido a través de la zona del arco, atomizando el metal fundido y proyectando las partículas sobre el sustrato previamente preparado. Las partículas fundidas que impactan en el sustrato solidifican rápidamente para formar una capa. Este proceso es de gran rendimiento, pero sólo se pueden aplicar materiales eléctricamente conductores (49). Un esquema del proceso por arco eléctrico es presentado en la figura 6.8.

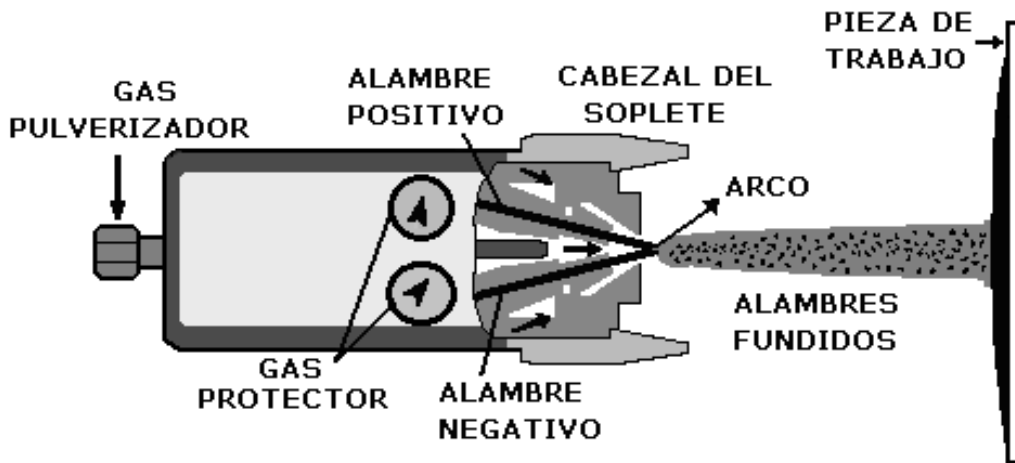


Figura 6.8. Esquema del proceso por arco eléctrico (49, 53)

Para aplicaciones especiales, se puede usar nitrógeno o argón como gas pulverizador, para evitar en gran parte la oxidación del revestimiento. La energía eléctrica aplicada en este proceso está entre 5 KW y 25 KW y los diámetros de alambre aplicados están entre 1,2 mm y 5 mm. Este proceso es utilizado para recubrir grandes superficies y para la protección contra la corrosión, entre otros usos. La porosidad es el mayor inconveniente para el uso del rociado térmico por arco, ya que los revestimientos tienen una porosidad moderada o alta, que está entre el 0,2 % y 15 %. Estos poros, aunque no son grandes, tienen una naturaleza de interconexión, por lo cual puede acelerar la falla por corrosión del revestimiento debido al mecanismo de superficie, ya que tiene un área de contacto más grande. El proceso es de simple funcionamiento y se puede utilizar de manera manual o automática. Es posible rociar una amplia gama de metales, aleaciones y compuestos de matriz metálica en alambre. Además, una limitada gama de capas de cermet (carburo de tungsteno u otros materiales duros) también se puede rociar en forma de alambre como matriz metálica, donde la fase de cerámica dura, en forma de fino polvo, se ensambla en una envoltura tubular de metal. Las puntas de contacto son dimensionadas para diámetros específicos de alambre. Durante la fusión de los alambres metálicos, estos pueden ser supercalentados hasta un punto donde puede ocurrir alguna volatilización, especialmente con aluminio y zinc. La combinación de altas velocidades 100 m/s y altas temperaturas de las partículas producen zonas de difusión, formando pequeñas zonas “soldadas”, permitiendo la

formación de un revestimiento con buena resistencia adhesiva y cohesiva, con bajos niveles de porosidad, pero con altos contenidos de óxidos. La resistencia adhesiva de este proceso está entre 10 MPa y 40 MPa, pudiendo llegar a 70 MPa, para algunos materiales. Un efecto negativo de la alta temperatura de las partículas atomizadas, es la tendencia de las aleaciones a cambiar la composición, debido a la oxidación selectiva, la vaporización o la ocurrencia simultánea de estos dos fenómenos (49, 50).

Este proceso tiene una alta velocidad de aspersion, comparado con otros procesos de rociado térmico, pudiendo alcanzar velocidades de deposición de hasta 60 kg/h para algunas aleaciones. Por otro lado, los parámetros que afectan la velocidad de aplicación son: la fuente de energía de corriente directa y la velocidad de alimentación del alambre, que se puede utilizar para la energía disponible. Este proceso es altamente eficiente, ya que toda la energía eléctrica en la antorcha es usada para fundir el metal (49). En la tabla 6.1, se presentan algunas características de los diferentes procesos del rociado térmico.

Tabla 6.1. Características y propiedades en procesos de rociado térmico (49, 50, 60)

	Velocidad de la partícula (m/s)	Adherencia (MPa)	Contenido de óxidos (en metales) %	Porosidad (%)	Velocidad de la deposición (kg/hr)	Espesor típico del depósito (mm)
Llama-Polvo	40 - 80	10 - 20	10 - 15	10 - 15	1 - 10	0,2 - 10
Llama-Hilo	70 - 150	15 - 30	5 - 10	5 - 10	5 - 20	0,2 - 10
HVOF	400 - 1000	> 70	1 - 2	1 - 2	1 - 5	0,2 - 2
Detonación	600 - 800	> 70	1 - 2	1 - 2	1 - 5	0,1 - 1
Arco	100 - 200	25 - 40	10 - 20	5 - 10	6 - 60	0,2 - 10
Plasma	100 - 300	25 - 70	1 - 3	5 - 10	1 - 5	0,2 - 2

El rociado térmico por arco tiene el índice más alto de deposición entre los diferentes procesos de rociado térmico y se puede utilizar para rociar grandes áreas y una gran cantidad de componentes de la cadena productiva o en operaciones repetitivas. Los usos típicos de este proceso incluyen: (49)

- Rociado con zinc y aluminio de grandes estructuras como puentes, calderas e instalaciones en zonas costeras para dar protección contra la corrosión.
- Recuperación de los componentes de ingeniería tales como cojinetes y ejes con aleaciones de acero y bronce.
- El rociado térmico de las cubiertas del componente electrónico con cobre, zinc y aluminio proporcionan un blindaje contra la interferencia electromagnética en capas conductoras.

Hay razones particulares por las que el rociado térmico por arco se puede seleccionar sobre otras técnicas superficiales de ingeniería y estas pueden incluir una combinación de las siguientes: (49)

- La necesidad de costos más bajos y de velocidades más altas de deposición.
- Recubrimiento de grandes áreas por equipos automáticos o manuales.
- Es fácil de usar y simple de aprender, con un mantenimiento fácil de hacer y es portátil.
- El funcionamiento de capa requerido puede tolerar cierto óxido y porosidad, con una mejor adherencia y velocidades más altas de deposición, que las capas producidas usando rociado térmico por llamas.

6.2.2.2. Rociado térmico por plasma con arco no transferido (APS)

El proceso de rociado térmico por plasma (*Air Plasma Spraying*), utiliza el calor de un arco que se forma dentro de la boquilla, entre un ánodo de cobre y un cátodo de tungsteno, ambos refrigerados por agua. El gas o la mezcla de ellos (argón, nitrógeno, hidrógeno, helio) fluyen alrededor del cátodo y a través del ánodo, los cuales son comprimidos en la boquilla para que atraviesen el arco y se calienten a temperaturas muy elevadas, ionizando el gas y produciendo el plasma. El propósito de esta constricción es controlar y aumentar la densidad de energía del flujo del arco. A la salida de la boquilla, el gas se asocia nuevamente liberando gran cantidad de calor, para fundir los materiales del revestimiento, en forma de polvo. El polvo es introducido en el plasma, siendo fundido y propulsado hacia

el sustrato a través de un flujo de alta velocidad. El material que se va a aplicar en el revestimiento es transportado por medio de un gas e inyectado en la llama de plasma, pudiendo estar situado el inyector de polvo en el interior o en el exterior de la boquilla. Las partículas deben fundirse completamente, sin una excesiva vaporización y permanecer fundidas hasta que colisionen con el sustrato. Si las partículas no se funden suficientemente, puede resultar un recubrimiento de pobre calidad.

Un factor básico a considerar es la distancia entre la pistola y la superficie a revestir, la cual oscila entre 25 mm y 150 mm. Para cada material de revestimiento y para cada pistola de plasma existe un tamaño adecuado de partícula de polvo, oscilando entre 5 μm y 60 μm . Un tamaño superior al adecuado originará que las partículas no lleguen a fundirse, con lo cual podrían separarse de la llama o rebotar en el sustrato sin adherirse a este. Por el contrario, un tamaño inferior al adecuado puede producir la vaporización de dichas partículas (49, 55, 59). Este proceso es usado con gran éxito en el rociado de aleaciones tipo cerámicas y carburos que necesitan una alta temperatura de fusión. Un aspecto importante de mencionar es que a pesar de las altas temperaturas de este proceso, la pieza a reconstruir sólo elevará su temperatura entre 38 °C y 260 °C. El proceso APS llevado correctamente es frío (relacionado con el sustrato que va a ser revestido), debido a que la temperatura del sustrato puede ser mantenida baja durante el proceso, evitando el daño por cambios metalúrgicos y distorsiones del sustrato de la pieza (49). En la figura 6.9, se observa un esquema de una antorcha de plasma.

La intensidad del arco, la relación de mezcla de los gases, velocidad del flujo de gas, la temperatura y la velocidad del chorro del plasma son controladas por el tipo de boquilla. La forma en que las partículas se introducen en la llama condiciona su fusión y posterior deposición. La presión del gas transportador del polvo, debe estar convenientemente ajustada para que las partículas lleguen a la llama, pero sin atravesarla. El flujo de gas requerido se determina en función del diámetro de la manguera de transporte, densidad del polvo, tamaño y forma del polvo, velocidad y densidad del gas transportador del polvo. La eficiencia de la proyección varía en función de la distancia de proyección. Los niveles de

energía en las antorchas de rociado térmico por plasma están entre 30 KW y 120 KW, además, el proceso produce un nivel de ruido por encima de 140 decibeles, exigiendo instalaciones con aislamiento acústico. Los parámetros de operación son críticos en la determinación de la temperatura y velocidad alcanzada por las partículas de polvo (49, 55, 64).

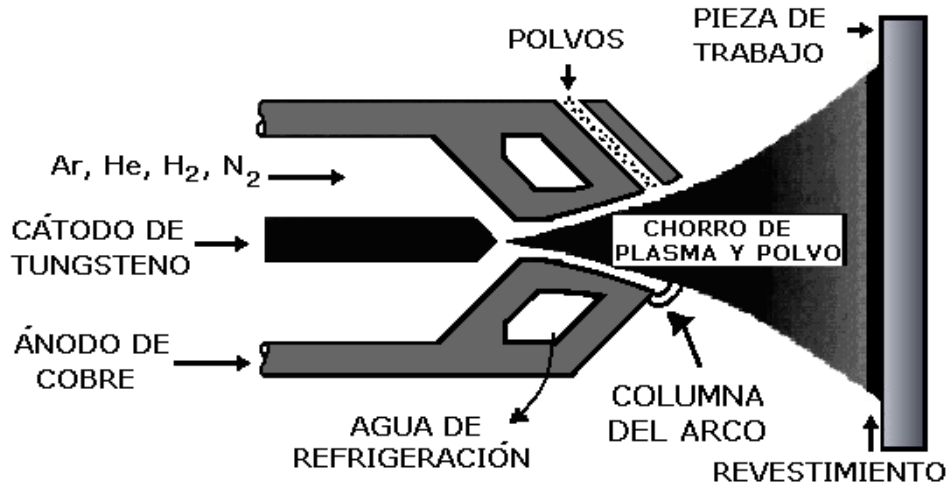


Figura 6.9. Esquema de antorcha de rociado térmico por plasma (49, 63)

El sistema APS es muy flexible debido a que desarrolla suficiente energía para fundir cualquier material, utilizando el material de aporte en forma de polvo. El arco generado es tan potente que separa los electrones de los gases llevándolos a un estado de la materia conocido como plasma. Mientras el plasma cambia de nuevo a su estado gaseoso, la energía térmica es liberada. Durante esta recombinación, las temperaturas llegan a los 17000 °C, lo cual excede la temperatura superficial del sol; en ese momento se inyecta el material de aporte en forma de polvo en la cámara de gases, el cual es fundido y disparado a alta velocidad hacia el sustrato previamente preparado, con la inyección de aire comprimido. La variación de la velocidad de las partículas del polvo está en función de la distancia de proyección. Para sistemas de 40 KW las velocidades de las partículas son alrededor de 300 m/s y para sistemas de 80 KW son de 500 m/s (49).

Las aleaciones y las cerámicas como materias primas del proceso por plasma, se diferencian en la manera como se alimentan en la pistola de rociado térmico. Los metales se

emplean como polvos y alambres, y la cerámica se utiliza como polvos y barras sinterizadas (para pistolas especiales), generalmente de 1/4 in de diámetro. En el rociado térmico por plasma se requiere un control muy cuidadoso de la distribución y del tamaño de partícula, como también de la química del polvo del material base. Se puede decir que las partículas esféricas, del mismo tamaño y químicamente homogéneas en el polvo, son preferibles a las partículas de diferentes formas, con distribuciones de tamaño amplias y no uniformes. Por supuesto, sería impráctico y costoso emplear un material base ideal en la mayoría de las aplicaciones. Sin embargo, en años recientes, ha llegado a ser posible acercarse al ideal, permitiendo la deposición económica de las capas del alto rendimiento para una amplia gama de aplicaciones exigentes. Este proceso está siendo usado principalmente en la industria aeronáutica y aeroespacial para realizar recuperación dimensional, recubrimientos resistentes al desgaste, barreras térmicas, entre otros (49, 51, 56, 65).

Para aplicaciones de alto desempeño, en las cuales se requiere mejorar la densidad y aumentar la adhesión y cohesión del revestimiento, disminución de óxidos, junto con una estructura óptima, el rociado térmico por plasma es realizado en una cámara de presión reducida con gas inerte (*Vacuum plasma spray –VPS*) o (*Low Pressure Plasma Spraying - LPPS*), los cuales operan a presiones entre 50 mbar y 200 mbar, usando gas de protección como argón o nitrógeno para aislar o retirar el oxígeno de la pieza de trabajo, ya que la presencia del argón o nitrógeno evita la reacción no deseada entre la atmosfera y el haz de plasma, el material base y el material proyectado. El revestimiento en el sistema VPS, se aplica a una temperatura más alta, por la baja transferencia térmica y el ambiente a baja presión, esto último, promueve una mejor interacción de las partículas fundidas con el sustrato dando como resultado capas más uniformes. El diámetro del polvo está entre 10 μm y 70 μm y puede alcanzar velocidades de deposición de 25 kg/h. La resistencia adhesiva está entre 15 MPa y 70 MPa y la cuidadosa selección de los parámetros de aspersión permite conseguir revestimientos con baja porosidad, entre el 1 % – 7 %. Los revestimientos por este proceso son finos, con granos equiaxiales y sin límites columnares, estas características son muy importantes para la aplicación de ciertas capas de cerámicos.

Además, estas capas son químicamente homogéneas y no tienen cambios en la composición con el aumento del espesor (49, 50, 66). A continuación se enumeran algunas características dominantes del rociado térmico por plasma: (49)

- Deposita metales, cerámicos o cualquier combinación de estos materiales.
- Forma microestructuras con grano fino, equiaxiales y sin límites columnares.
- Produce depósitos que no cambian la composición con el espesor (duración del tiempo de la deposición).
- Puede depositar un metal o una mezcla metal-cerámico continuamente, con sólo variar la mezcla de los metales y de la cerámica.
- Altas velocidades de deposición (4 kg/h).
- Se deposita en diferentes formas y en cualquier material.
- Procesa los materiales en cualquier ambiente; “ejemplo, aire, gas inerte a baja o alta presión”.

6.2.2.3. Rociado térmico por plasma con arco transferido (PTA)

En el proceso de rociado térmico por plasma con arco transferido o *Plasma Transferred Arc* (PTA), el material del recubrimiento en forma de polvo así como la superficie del sustrato es fundida, por medio de un plasma transferido de alta densidad. Este plasma se origina cuando un arco piloto es generado entre el electrodo (cátodo) y la boquilla (ánodo) y se utilizan como gases generadores del plasma el argón, helio o mezclas de ellos, en donde el gas es ionizado formando el estado plasmático, el cual es eléctricamente conductor. Después de generar el arco, este es transferido entre la pieza de trabajo (ánodo) y el electrodo (cátodo), creando un charco fundido en la pieza de trabajo. El material de aporte es transportado por la corriente de los gases plasmógenos y mezclado en estado fundido con la superficie del sustrato. Todo el proceso se realiza bajo una atmósfera gaseosa protectora de argón o mezclas de argón con hidrógeno. La fusión superficial y la profundidad de la penetración son controladas por la entrada de corriente para generar el arco, además, el material de aporte puede estar en forma de polvo o alambre, obteniéndose depósitos densos,

localizados y unidos metalúrgicamente al metal base (49). La figura 6.10 es una representación esquemática del proceso por plasma de arco transferido.

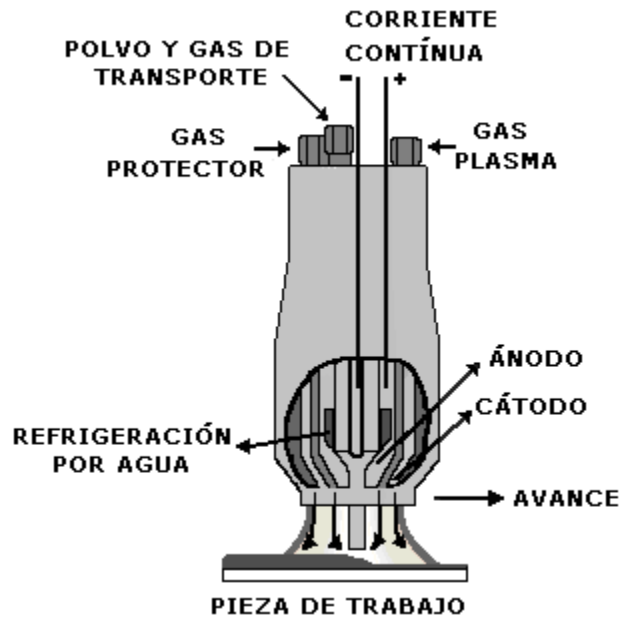


Figura 6.10. Esquema de rociado térmico por plasma con arco transferido (PTA) (49, 53)

El proceso PTA se puede considerar como un proceso de soldadura, en el cual se pone un revestimiento metálico al sustrato para producir superficies resistentes al desgaste, endurecimiento superficial, donde la dilución entre el sustrato y el material del recubrimiento es mínima (5 % - 10 %), comparada con el 20 % o 25 % de los procesos de soldadura. También tienen la zona afectada térmicamente, que es muy pequeña y alcanza una velocidad de deposición de 20 kg/h, logrando altos espesores en un solo pase y los espesores de estos revestimientos varían entre 0,5 mm y 6 mm. Aunque este proceso se puede considerar como un proceso de soldadura, tiene la ventaja de que no produce escoria, ya que tiene una protección gaseosa. Dependiendo del uso, los revestimientos pueden ser resistentes a la corrosión, altamente densos, uniformes y libres de impurezas. Los materiales de aporte más usados son aleaciones de níquel, hierro y cobalto, para el endurecimiento superficial de asientos de válvulas, equipos agrícolas y de minería. Como este proceso tiene calentamiento y fusión superficial del sustrato, es inevitable alguna alteración de la microestructura y pequeñas distorsiones, además, sólo se puede aplicar a

substratos eléctricamente conductores y que soporten pequeñas deformaciones (49, 50, 67). Las principales características del proceso de rociado térmico por plasma con arco transferido son: (49)

- Produce revestimientos duros resistentes al desgaste.
- Unión metalúrgica con el sustrato del metal base.
- Este proceso ofrece baja dilución con el metal base.
- Los revestimientos son densos y con alta resistencia a la corrosión.
- Puede ser automatizado.
- Se pueden construir revestimientos gruesos.
- Las imperfecciones de la superficie se pueden llenar.
- Los revestimientos se aplican rápidamente.
- A las superficies de los revestimientos se les puede dar un acabado final.

6.3. Cuidados con la preparación de las piezas

En la preparación de las piezas debe proveerse una terminación adecuada para que los extremos de los depósitos queden protegidos, por tal motivo, hay que procurar que los extremos terminen con una ligera concavidad o en chaflán y nunca en ángulo recto; cuando no se puede mecanizar la pieza, se debe aplicar un cordón de soldadura para consolidar los extremos. Antes de recargar una pieza desgastada irregularmente “por ejemplo un eje”; conviene en general, uniformizar el diámetro con un mecanizado previo. Cuando las piezas llevan chaveteros, se coloca una chaveta de madera que sobresalga de 0,3 mm a 0,5 mm, sobre la cota definitiva. Después del mecanizado la chaveta reaparece y se retira fácilmente. Como operación final, debe redondearse ligeramente los ángulos del rociado térmico. La importancia de la inspección debe ser reconocida. El trabajo se debe examinar en cuatro etapas: (1) antes del tratamiento de limpieza; (2) después de la preparación superficial e inmediatamente antes del rociado térmico; (3) después del rociado térmico y (4) después del almacenamiento o del transporte. Las piezas rociadas térmicamente no puede exponerse a choques directos, además la forma de las piezas impone una limitación al rociado térmico, puesto que el chorro de partículas fundidas y semifundidas debe proyectarse perpendicular

a la superficie y en casos excepcionales, el ángulo de proyección del material no debe ser inferior a 45° (49).

6.4. Tratamiento de los revestimientos con sellantes

Los revestimientos rociados térmicamente tienen niveles de porosidad que van desde menos del 1 %, hasta el 20 %, dependiendo del proceso de deposición y de los parámetros utilizados, del material aportado y del sustrato, entre otros. Además la porosidad algunas veces es interconectada y puede extenderse desde la superficie hasta el sustrato. Algunos recubrimientos porosos son densificados al ser infiltrados con metales líquidos, polímeros y otros materiales, que producen el sellado de los poros del revestimiento. La forma de sellar el revestimiento depende de las condiciones de trabajo y de la compatibilidad entre el sellante y el revestimiento. La mayoría de los sellantes orgánicos se usan a baja temperatura, para llenar y sellar la porosidad de los revestimientos rociados térmicamente, como también, para prevenir o disminuir la corrosión en la interfase sustrato/revestimiento, aumentar la vida del revestimiento, prevenir la fuga de fluidos y mantener las constantes dieléctricas de los revestimientos cerámicos (49).

6.5. Dinámica de formación de los revestimientos

Los revestimientos rociados térmicamente son formados por depósitos de sucesivas capas de gólicas líquidas (millones de partículas por cm^2/s), que se aplanan y solidifican, resultando una macroestructura conocida como lenticular o laminar, debido al impacto de las partículas calentadas y aceleradas sobre el sustrato, estas se aplanan en forma de pequeñas lentes. Cuando inciden sobre el sustrato, esas pequeñas gólicas, en forma de lentes, se enfrían a velocidades extremadamente altas y se anclan mecánicamente en las irregularidades de la superficie. La estructura típica de revestimientos rociados térmicamente es la unión cohesiva consolidada de láminas del material rociado, entremezclada con inclusiones de óxidos, microgrietas, partículas sólidas y porosidad. Las características físicas y el comportamiento del depósito dependen de las fuerzas cohesivas

entre las láminas, el tamaño y la morfología de la porosidad, la aparición de grietas y defectos en la microestructura ultra fina y granulosa dentro de las mismas láminas. Las características del depósito son afectadas por la temperatura de las láminas, la viscosidad de las láminas, la tensión de superficie, así como otras consideraciones que implican las características físicas de las láminas, como son: la velocidad de enfriamiento, los criterios de solidificación, nucleación y crecimiento de cristales, formación de la fase, etc. La forma de las láminas es influenciada por el ángulo de aspersion y tienen un fuerte efecto en las características del depósito, tales como porosidad, eficiencia del depósito y microdureza. En la figura 6.11, se observa una capa rociada térmicamente, donde hay una estructura laminar, entremezclada con inclusiones, poros y óxidos (49).

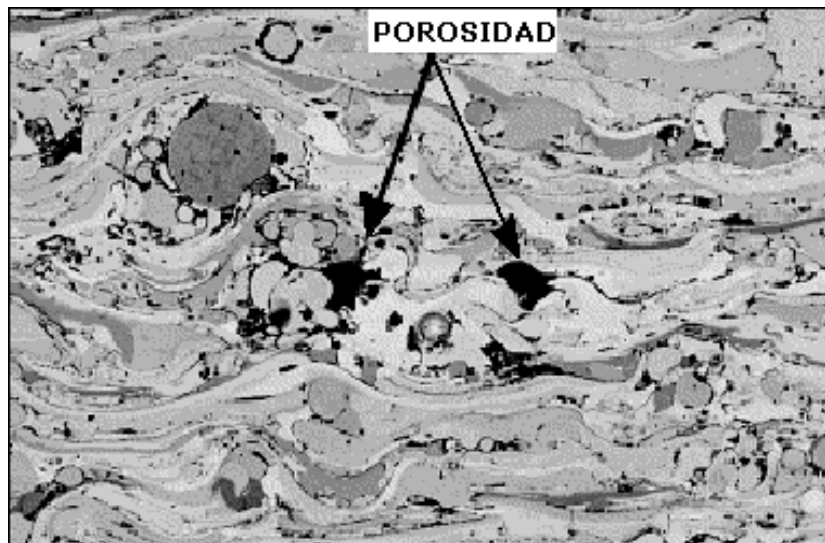


Figura 6.11. Estructura típica de una capa rociada térmicamente (49, 67)

Las propiedades del revestimiento rociado térmicamente están directamente relacionadas con el procedimiento empleado, los parámetros utilizados, el material de aporte, tipo de sustrato, así como de la preparación del mismo y de su temperatura antes, durante y después de la proyección térmica. También tendrán influencia en la calidad del recubrimiento, las reacciones químicas entre partículas, el tamaño de las mismas, así como la forma de la pieza, la velocidad de avance de la pistola con relación a la pieza, el ángulo de las partículas sobre la pieza, la distancia de proyección, entre otras. En el rociado térmico, se debe tener cuidado con el uso de polvos con altos contenidos de suciedad, ya

que el uso de estos polvos forman vacíos y aumentan la oxidación, deteriorando las propiedades mecánicas del revestimiento, además, la inyección de partículas muy finas, menos de 5 μm , dentro de los sistemas de calentamiento es muy difícil, aunque aseguran una fusión completa de la partícula. El éxito en el uso de los revestimientos rociados térmicamente depende, en gran parte, de las propiedades mecánicas y de la adhesión al sustrato, ambas están unidas a la microestructura del revestimiento. A menor porosidad mejores propiedades mecánicas (49, 50, 64, 68).

Es por tanto necesario desarrollar una buena comprensión de los principios fundamentales que gobiernan la fusión de las partículas, formación de la micro gota, choque y esparcimiento de la micro gota y la solidificación, de modo que la correlación entre los parámetros del proceso (velocidad y temperatura del gas, temperatura del sustrato, características termo-físicas, tamaño de las partículas y materiales) y las características de los *splats* pueden ser establecidas y la calidad del revestimiento puede ser controlada. Las propiedades más comunes para caracterizar revestimientos rociados térmicamente son la adhesión/cohesión del revestimiento, su dureza y la resistencia al desgaste (49).

Los revestimientos rociados térmicamente requieren de una rugosidad específica en el sustrato para que puedan tener una buena adherencia, debido a que la unión es en gran parte por entramamiento mecánico, pero algunos materiales son capaces de efectuar una unión altamente adhesiva, aún en sustratos lisos o hasta pulidos. Esos materiales son llamados capas de unión (*bond coats*) y pueden ser aplicados solos o como una fina capa de enlace (entre 80 μm y 200 μm) para otros materiales de revestimiento externo. Estos revestimientos son bastante útiles cuando no es posible una preparación adecuada del sustrato de la pieza en cuanto a la rugosidad, pero si es aplicado sobre un sustrato con una preparación adecuada y rugosa, mejora aún más la característica adhesiva de cualquier proceso. Estos materiales se pueden adherir al sustrato bajo cualquier condición de rugosidad superficial y una fina capa de ellos sirve como anclaje para un posterior rociado térmico con otro material (49, 50, 54, 68, 69).

7. METALURGIA DE LA SOLDADURA

Durante el proceso de soldadura ocurren diferentes fenómenos metalúrgicos complejos como, fusión, reacciones metal-gas, reacciones metal-escoria, transformaciones de fase durante la solidificación, transformaciones de fase de estado sólido, deformaciones causadas por el calor y tensiones de contracción, entre otras; que pueden causar muchos problemas prácticos y tienen gran influencia en la calidad de las uniones soldadas, ya que cambian las propiedades mecánicas de la zona de fusión y la zona afectada térmicamente. Estos problemas se pueden evitar aplicando principios metalúrgicos apropiados a dicho proceso, aunque la metalurgia de la soldadura difiere un poco de la metalurgia convencional. Los diagramas de fase y el ciclo térmico en la soldadura se deben integrar para explicar la evolución de la microestructura y las propiedades mecánicas en soldaduras. Los aspectos metalúrgicos que tiene lugar en la zona de soldadura durante el enfriamiento difieren en algo de los que se observan durante el enfriamiento de una pieza fundida. En la soldadura, el metal fundido se solidifica en cuestión de segundos. La cantidad de metal rara vez excede de una pulgada cúbica. La fuente de calor y el charco de material fundido tienen una temperatura considerablemente más elevada que en los hornos de fusión. Como resultado del rápido enfriamiento del charco de soldadura, las reacciones químicas entre el metal fundido y la escoria tienen poco tiempo para realizarse. Estas reacciones ocurren en forma muy rápida, en contraste con lo que sucede en otras áreas tales como fabricación de aceros, fundición y tratamiento térmico (38, 70, 71, 72).

Los diagramas de transformación isotérmica y los diagramas TTT pueden ser útiles para el análisis de la metalurgia de soldadura, sin embargo, se deben considerar algunas diferencias fundamentales entre la soldadura. La temperatura máxima en el cordón de soldadura supera el punto de fusión del metal y en aceros la ZAT puede acercarse a 1500 °C. Para la soldadura, la velocidad de calentamiento es muy alta y el tiempo de sostenimiento por encima de A_3 es muy corto. La temperatura no es uniforme con diferentes gradientes de temperatura y velocidades de enfriamiento, que influyen la transformación y el desarrollo

de la microestructura. Es difícil predefinir la manera como ocurrirán las transformaciones de fase y garantizar qué tipos de fase se formaran durante la soldadura, ya que los fenómenos térmicos y metalúrgicos dependen estrechamente de los parámetros de soldadura (por ejemplo, entrada de calor, velocidad de soldadura y secuencia de soldadura). Por lo tanto, el comportamiento térmico y metalúrgico durante la soldadura es difícil de predecir y los modelos cinéticos simplificados de transformación con difusión (transformación de austenita a ferrita y perlita) o sin difusión (transformación de austenita a martensita) no pueden elaborar con precisión los fenómenos de transformación y desarrollo microestructural en la soldadura. El comportamiento metalúrgico de la soldadura es complejo y no es simplemente una transformación entre la fase principal y una nueva fase. Varias transformaciones pueden ocurrir debido a la coexistencia de múltiples fases en la ZAT. Los componentes y las proporciones de la fase de equilibrio deben determinarse por cinética, teniendo en cuenta el comportamiento de transformación multifásica, la dirección de transformación, las condiciones de enfriamiento, la temperatura y el tiempo (72). La estructura de un cordón de soldadura es el resultado de una serie de transformaciones que comienzan con las reacciones en el metal en estado líquido y siguen con los cambios asociados al paso de líquido a sólido. Desde el proceso de solidificación, se debe conocer cómo se forman las distintas estructuras, comenzando con la llamada, **estructura primaria o de solidificación**, que luego, a través de las transformaciones termo mecánicas sufridas en estado sólido, se forma la **estructura secundaria o final** (70).

Los procesos de soldadura por fusión se caracterizan por la presencia de un charco de soldadura o baño de fusión, constituido por una fracción del metal que permanece en estado líquido por un cierto lapso, durante la ejecución de la soldadura. Este líquido está compuesto tanto por metal base fundido, como por metal de aporte (dilución). El charco de soldadura permanece líquido por la presencia de la fuente de calor, que en general se desplaza con un movimiento uniforme. Bajo estas condiciones, charco de soldadura adquiere una geometría estacionaria (una forma de pileta líquida estacionaria que se mantiene al moverse la misma a lo largo de la soldadura). El líquido interactúa (el breve tiempo disponible), con el medio que lo rodea a través de reacciones metal-escoria y/o

metal-gas. El resultado es un metal líquido que contiene inclusiones no metálicas (reacciones con escoria y fundentes) y gases disueltos (reacciones metal – gas), productos de las reacciones mencionadas. Además hay transformaciones en estado sólido producidas durante el proceso de solidificación de la soldadura, por lo anterior la estructura cristalina de la soldadura será el resultado directo de la secuencia de todos los eventos que ocurren previos y durante la solidificación. Algunos conceptos de la metalurgia general fueron descritos en el capítulo 2 y acá serán discutidos conceptos de la metalurgia de la soldadura. Se pretende que este capítulo sea aprovechado tanto por profesionales que actúan en el área de soldadura técnica y comercial, donde su principal objetivo es presentar informaciones básicas en el ámbito tecnológico. En resumen, se puede decir que la metalurgia de la soldadura estudia el comportamiento del metal durante el proceso de soldado y los efectos de este en las propiedades de la pieza soldada.

7.1. Dilatación y contracción en la soldadura

Para realizar adecuadamente un proceso de soldadura, se requiere conocer las leyes de dilatación y contracción, fenómenos propios que sufren los metales al ser calentados, si se quiere tener éxito en las aplicaciones de soldadura. Así que los metales se expanden y contraen por efecto de la temperatura, al calentar el metal absorbe energía y se dilata, aumentando de tamaño, cuando el metal se enfría, se ejercen esfuerzos de contracción y el material disminuye de tamaño. Cuando el calentamiento y el enfriamiento son uniformes y la dilatación no es obstaculizada, la pieza mantiene su forma y vuelve a tomar sus dimensiones, pero si el calentamiento o el enfriamiento no es uniforme o la dilatación es obstaculizada, se generan esfuerzos internos que pueden distorsionar la pieza (18). Durante un proceso de soldadura, el calentamiento es localizado y no hay uniformidad en la temperatura de la pieza, además que las diferentes formas y geometrías que pueden presentar la pieza, hacen que sea factible la distorsión de esta, debido a que, a medida que se va solidificando el cordón de soldadura este se contrae, generando esfuerzos en este y en la zona afectada térmicamente. Estos esfuerzos, que son los encargados de causar la distorsión o la rotura prematura de la pieza en el área de soldadura, pueden ser eliminados o

disminuidos por tratamientos térmicos o mecánicos. Se debe tener en cuenta que los esfuerzos residuales afectan el comportamiento de los materiales ante la fractura y pueden ayudar a que se presente fallas por fatiga o por corrosión. Los esfuerzos de dilatación y contracción no pueden evitarse, sin embargo pueden ser controlados y en algunos casos se puede hacer que trabajen a favor y no en contra. El control de la distorsión empieza con el diseño de la geometría de la pieza y de la junta. Las piezas pueden ser pretensionadas para anticipar la distorsión y de esta forma evitarla. También se deben planear soldaduras balanceadas, evitando la acción de la fuerza de la gravedad, para esto algunas veces se requiere estimar la cantidad de distorsión y se coloca el metal con un ángulo que lo compense, ya que la pieza desalineada es llevada al alineamiento por el cordón de soldadura. El método de soldar en retroceso aporta menos calor a la pieza y es más efectivo para reducir la distorsión, en algunos casos, cordones alternados pueden cancelar o disminuir la distorsión y se hace un calentamiento menos localizado en la pieza. Otras formas de atenuar las distorsiones en la soldadura son el precalentamiento local y el punteado para inmovilizar los bordes que se van a soldar, estos puntos de soldadura están alejados según el grosor de las piezas. La contracción transversal es más crítica, cuanto más rígidas o bridadas estén las piezas y se corre el riesgo de que aparezcan fisuras en la soldadura o en la zona afectada térmicamente, si el material no tiene la plasticidad suficiente. El punteado disminuye el riesgo de fisuras por la contracción transversal. La falta de punteado o piezas rigidizadas pueden presentar distorsiones como las presentadas en la figura 7.1. (18).

7.2. Técnicas para mantener la integridad de soldaduras

Las técnicas como el precalentamiento, poscalentamiento, alivio de tensiones y martillado, buscan, además de mantener las propiedades del metal base, que la pieza al final del proceso de soldado se mantenga con la forma y dimensiones originales, evitando distorsiones, esfuerzos residuales, aparición de fases frágiles, agrietamiento, entre muchos otros problemas que pueden aparecer durante la operación de la soldadura. Las técnicas mencionadas se resumen a continuación (18).

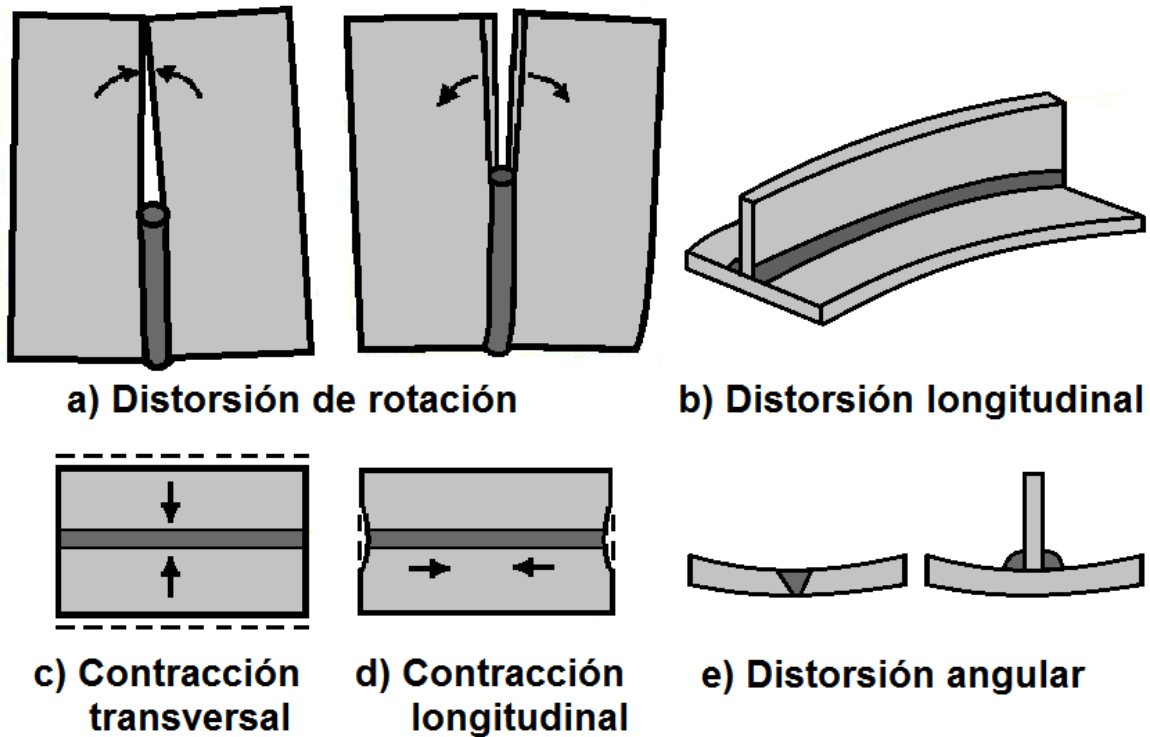


Figura 7.1. Esquemas de distorsiones en piezas durante la soldadura (8, 18)

7.2.1. Pre calentamiento

Esta operación consiste en el calentamiento de la junta previo a la soldadura, ya que la mayoría de los metales son buenos conductores de calor, razón por la cual, el calor es transferido rápidamente desde el cordón de soldadura, a través de toda la masa metálica involucrada en el proceso, lo que conlleva a un enfriamiento relativamente rápido. En algunos metales, ese enfriamiento rápido puede contribuir a la formación de microestructuras perjudiciales en la región soldada y en zonas aledañas. El pre calentamiento de la junta a ser soldada es una manera de reducir la tasa de enfriamiento del metal del cordón de soldadura. La temperatura de pre calentamiento puede variar desde 10 °C a 540 °C, siendo más comúnmente aplicada en el intervalo de 66 °C a 150 °C. El pre calentamiento es un medio efectivo para reducir el agrietamiento del cordón de soldadura y del metal base. El pre calentamiento del metal base, cerca de donde se va a realizar la soldadura, inhibe su habilidad de absorber calor generado en el proceso. Como consecuencia, la velocidad de enfriamiento de la soldadura disminuye y se minimiza o

elimina el riesgo de formación de estructuras duras y frágiles, especialmente en la zona afectada térmicamente. Además la soldadura solidifica con menos esfuerzos debido a que la contracción ha sido más uniforme. El objetivo del precalentamiento es disminuir la pendiente de la curva de enfriamiento de los diagramas TTT (ver capítulo 2). El único inconveniente del precalentamiento es que aumenta la zona afectada térmicamente (ZAT) (18).

Para aceros al carbono, con un contenido de carbono hasta 0,25 %, no es necesario el precalentamiento de la pieza a menos que su espesor sea mayor a $\frac{3}{4}$ in. Para aceros con un contenido de carbono entre 0,3 % y 0,40 %, es conveniente precalentar la pieza entre 10 °C y 150 °C, para no alcanzar la velocidad crítica de enfriamiento (velocidad de enfriamiento suficientemente lenta para evitar la transformación de fases duras y frágiles). Para aceros con un contenido de carbono mayor al 0,45 % y aceros de baja aleación, en los cuales los elementos de aleación intervienen en la templabilidad del acero, se deben precalentar según la cantidad de carbono equivalente. Se sabe que la soldabilidad es opuesta a la templabilidad y la templabilidad es función del contenido del carbono equivalente (18). Durante la soldadura de aceros de alto carbono o de alta aleación, existe el peligro de que el depósito de soldadura y la zona térmicamente afectada, contengan altos porcentajes de martensita (microconstituyente duro del acero). Tales soldaduras poseen alta dureza y baja ductilidad y pueden agrietar la pieza durante el enfriamiento. El objetivo del precalentamiento (y también del poscalentamiento) es mantener la cantidad de martensita de la soldadura a un nivel mínimo. Con ambos tratamientos se obtiene mejor ductilidad, baja dureza y menor probabilidad de agrietamiento durante el enfriamiento. La necesidad del precalentamiento aumenta con los siguientes factores: (18)

- Contenido de carbono en el material base.
- Contenido de elementos aleantes en el material de base.
- Tamaño de la pieza.
- Temperatura inicial.
- Velocidad de soldado.
- Diámetro del electrodo.

La templabilidad del acero está fuertemente ligada a su composición química y el carbono equivalente. Mayores cantidades de carbono y de algunos elementos de aleación resultan en mayor templabilidad, y por lo tanto una soldabilidad menor, por la aparición de fases duras y frágiles. Para poder evaluar la soldabilidad de las aleaciones, se usa una medida conocida como el contenido carbono equivalente, que compara las soldabilidades relativas de diferentes aleaciones con respecto a un acero al carbono simple. A medida que se eleva el contenido equivalente de carbono, la soldabilidad de la aleación baja. La adición de elementos de aleación permite mejorar las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión. Estas adiciones generalmente desplazan las curvas TTT hacia la derecha, aumentando la templabilidad del material. Las fórmulas de carbono equivalente (CE) expresan la tendencia del material a formar estructuras frágiles, y por lo tanto promover la aparición de fisuras por hidrógeno. El cálculo de la temperatura de precalentamiento (t_p), se hace teniendo en cuenta el carbono equivalente total (CE), el cual es afectado por los elementos de aleación y el espesor de la pieza. En la tabla 7.1 se presenta algunos valores de precalentamiento recomendados según el carbono equivalente. La expresión para calcular la temperatura de precalentamiento es: (18, 70)

$$T_p = 350\sqrt{(CE. - 0,25)} \quad (7.1)$$

$$CE = C_q + C_e \quad (7.2)$$

$$C_q = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr}{10} + \frac{\%Ni}{20} + \frac{\%Cu}{40} - \frac{\%Mo}{50} - \frac{\%V}{10} \quad (7.3)$$

$$C_e = 0,005 * e * C_q \quad (7.4)$$

$$CE = C_q(1 + 0,005 * e) \quad (7.5)$$

Donde:

C_q : Carbono equivalente es función de la composición

C_e : Carbono equivalente en función del espesor y C_q

e : Espesor en mm

Tabla 7.1. Temperatura de precalentamiento recomendada según el carbono equivalente (18, 73)

Carbón equivalente CE, %	Temperatura de precalentamiento recomendada
< 0,30	Opcional
0,31 - 0,45	100°C - 200°C
0,45 - 0,60	200°C - 250°C
> 0,60	250°C - 300°C
Aceros herramienta, aceros para resortes, aceros de composición desconocida	~ 300°C

7.2.2. Post-calentamiento

El post-calentamiento, dentro de este contexto, significa el calentamiento de la junta soldada inmediatamente después de que la soldadura fue realizada. Este tratamiento es bien diferente de otros ejecutados después del enfriamiento de la soldadura tales como alivio de tensiones, revenido y recocido. El post-calentamiento tiene la misma función del precalentamiento y es la de mantener la temperatura de la pieza en un nivel suficientemente elevado, de tal manera que la junta soldada enfríe lentamente. Así como en el precalentamiento, el resultado es una ductilidad mayor en la región soldada. El post-calentamiento raramente es aplicado de forma aislada; y casi siempre es conjugado con el precalentamiento. El post-calentamiento es más frecuentemente empleado en aceros altamente templables, aunque algunas veces es utilizado en aceros menos templables, en caso que sea difícil la aplicación de un precalentamiento adecuado, debido a la dimensión de las piezas a ser soldadas (18). El post-calentamiento busca disminuir la velocidad de enfriamiento para aumentar la difusión de hidrógeno y facilitar su eliminación del metal del cordón de soldadura. Además del precalentamiento y del post-calentamiento, hay otros tratamientos térmicos, que son empleados en juntas soldadas para modificar las propiedades del metal soldado, entre ellos están: el alivio de tensiones, el recocido, normalizado, temple,

revenido y bonificado. Estos tratamientos requieren temperaturas más altas que el precalentamiento y el post-calentamiento. Aunque son actividades de post-calentamiento, en el sentido de que son aplicados después de que la soldadura fue aplicada, pero difieren de este, en el hecho de que la soldadura se deja enfriar antes que el tratamiento sea iniciado. Todos estos tratamientos son ampliamente utilizados en soldaduras de aceros al carbono y en aceros de baja, media y alta aleación (27, 71).

7.2.3. Alivio de tensiones

Los metales se expanden cuando son calentados o se contraen si son enfriados. La dilatación es directamente proporcional a la variación de temperatura o, a la cantidad de calor aplicada. En una unión soldada, el metal más próximo del cordón está sujeto a las más altas temperaturas y, a medida que aumenta la distancia a este, la temperatura disminuye. El calentamiento heterogéneo causa contracción-expansión, también heterogénea, y puede causar distorsiones y tensiones internas en la pieza soldada. Dependiendo de la composición y aplicación, el metal puede a veces no ser capaz de resistir tales distorsiones y agrietarse, o puede ocurrir falla prematura de la pieza. Una manera de minimizar esas tensiones, o de aliviarlas, es a través de un calentamiento uniforme de la estructura después que la soldadura ha sido realizada. El metal es calentado a temperaturas un poco por debajo del punto donde pueda ocurrir alguna alteración microestructural y luego enfriado lentamente (18).

El objetivo del alivio de tensiones es reducir las tensiones del proceso de soldadura y llevar a la unión soldada a una condición más duradera; la ductilidad es aumentada sobremanera, sin embargo, la resistencia mecánica disminuye ligeramente. Ciertos códigos permiten mayores esfuerzos de diseño, desde que sea aplicado el alivio de tensiones. Típicamente, el alivio de tensiones consiste en el calentamiento de la pieza a una temperatura alrededor de 600 °C y un tiempo de sostenimiento, a esa temperatura, de una hora por cada 25 mm de espesor. El conjunto es enfriado lentamente al aire calmado hasta 300 °C. Si es imposible llevar la pieza a esas altas temperaturas, pueden ser empleadas temperaturas más bajas con

un tiempo de sostenimiento más prolongado. La tabla 7.2 muestra algunos tiempos recomendados conforme la temperatura empleada para el alivio de tensiones. El alivio de tensiones es un factor muy importante que se debe tener en cuenta para una buena aplicación del cordón de soldadura. Este tipo de alivio de tensiones se puede hacer por precalentamiento, post-calentamiento y martillado (18).

Tabla 7.2. Tiempo y temperatura de alivio de tensiones (18, 73)

Tiempo y temperatura de alivio de tensiones	
Temperatura, °C	Tiempo, (h / 25 mm)
595	1
565	2
535	3
510	5
480	10

7.2.4. Martillado

El martillado reduce los esfuerzos creados en el cordón de soldadura. Este procedimiento no se debe realizar en el primer pase (cordón de raíz), o en la última capa de soldadura, ya que si se martilla en el primer pase o cordón de raíz, se puede agrietar la soldadura o separar las partes y al martillar la última capa se puede limitar la realización de un recocido posterior del metal (18).

7.3. Fisuración por hidrógeno

La fisuración asistida por hidrógeno o fisuración fría, se manifiesta por la aparición de fisuras inmediatamente después de completada la soldadura, o transcurridos minutos y en algunos casos hasta 48 horas después de haber terminado la soldadura. Estas fisuras pueden

presentarse en el cordón de soldadura o en la zona afectada térmicamente en el material base. Para la aparición se requiere que ocurran los siguientes factores:

- 1) Hidrógeno difusible en el metal de soldadura o en la zona afectada térmicamente.
- 2) Una microestructura susceptible, como la martensita y la bainita de alta dureza y baja tenacidad, son especialmente frágiles cuando están saturadas de hidrógeno.
- 3) Alto grado de restricción o tensión residual en la junta, debidas a tensiones residuales o térmicas.
- 4) Baja de temperaturas entre $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Es necesaria la combinación de estos factores para producir una fisura por hidrógeno. El mecanismo por el cual se produce una fisura por hidrógeno viene de la mano con la disolución de este elemento en forma intersticial, en sitios preferenciales tales como bordes de grano, inclusiones y defectos cristalinos. La teoría más aceptada es la “de-cohesión”, la cual sostiene que donde existe una discontinuidad (pre-fisura), y se aplica una tensión de tracción, el hidrógeno se acumula en la región de mayor deformación (en el extremo de la discontinuidad). Esto reduce la energía cohesiva de la red cristalina, hasta un punto en que se produce la fisura. Entallas como mordeduras, falta de penetración e inclusiones promueven deformaciones plásticas que ponen en movimiento los defectos cristalinos. Cuando el grado de restricción de la junta es bajo, la fisura será intergranular, en tanto que para altos factores de restricción, la fisura será transgranular. El hidrógeno posee una difusividad (capacidad para dispersarse) muy superior a la del carbono o del nitrógeno y la solubilidad del hidrógeno en el acero es muy alta cuando está en estado líquido comparada con la solubilidad en el acero en estado sólido, además, la solubilidad del hidrógeno en el acero decrece con la temperatura del metal líquido, por esta razón hay que reducir las fuentes de hidrógeno como el revestimiento orgánico de electrodos, la humedad absorbida o contenida por revestimientos de electrodos, especialmente básicos, la humedad del fundente en proceso por arco sumergido y la humedad del gas en procesos de protección gaseosa (18, 27).

7.4. Transformaciones de fase de estado sólido en el acero

Las transformaciones de fase del acero, en el estado sólido, son un tema fundamental en la metalurgia de la soldadura, ya que en todas las soldaduras se producen tratamientos térmicos después de aplicado el cordón. Durante y después de este procedimiento, la estructura de la aleación cambia, ya sea por un proceso de recuperación y recristalización o por algún tipo de transformación de fase. Al comparar las fases antes y después de la transformación, se pueden observar cambios en la estructura, en la composición y en el tamaño de grano. El acero, al ser una aleación hierro – carbono, mezclado con otros elementos aleantes, que alteran las propiedades del material, presenta varias temperaturas de solidificación y se pueden presentar varias transformaciones de fase de estado sólido. Durante la soldadura es común que se presenten tres tipos de estas transformaciones, las cuales se deben tener en cuenta, esas son: la precipitación de una fase a partir de soluciones sólidas, la reacción eutectoide y la transformación martensítica. Todas las aleaciones solidifican en un intervalo de temperaturas, con diferentes temperaturas líquido - sólido. Al enfriar el metal fundido por debajo de la línea líquidus, se inicia en las aleaciones, la nucleación y crecimiento de la fase sólida (18). El sólido obtenido por cristalización primaria, presenta los granos en diversas formas que dependen de su tamaño, de la naturaleza de la fase y de la velocidad de solidificación. En las estructuras bifásicas se tiene una morfología de agregado eutéctico, donde toda su estructura se produce como consecuencia de una doble sobresaturación, que determina la precipitación simultánea de dos fases sólidas a partir de una líquida. Como la proporción global de los componentes, en ambas fases sólidas, es la misma que en la fase líquida que coexiste con ellas, a la temperatura de la reacción, la composición de ésta no varía, mientras tiene lugar la reacción. Por tal motivo no se produce micro segregación. Además, hay también estructuras eutécticas “divorciadas” o “segregadas”. La estructura del eutéctico está determinada por las condiciones existentes en el frente en solidificación (18). La morfología de los precipitados formados a partir de una solución sólida es más variada que los obtenidos de una solución líquida. Esto se debe a que en la estructura del estado sólido presenta límites de grano, límites de fase y la posibilidad de sostener un estado metaestable de

sobresaturación a temperaturas muy por debajo de la línea de solvus del diagrama de equilibrio. Además, la temperatura es la que principalmente determina la velocidad de enfriamiento. En las soluciones sólidas la nucleación puede ser homogénea (sin mostrar segregaciones dentro de la masa de solución), o heterogénea (en los límites de grano o de fase) (18).

7.5. Fenómenos de cristalización del metal fundido en la soldadura

El estudio de los **fenómenos de cristalización**, permite comprender dos aspectos relevantes de la solidificación durante el proceso de soldadura: **el primero** es que a medida que se desarrolla el proceso de cristalización, hay un pequeño agrupamiento de átomos que comienzan a arreglarse en una determinada estructura cristalina. Esos pequeños cristales, dispersos en el medio líquido, se encuentran orientados en todas las direcciones y, en la medida que la solidificación continúa, más cristales se forman a partir del metal líquido circundante y cada vez participa un número mayor de cristales. Al principio se acelera el proceso, pero en cierto momento, el encuentro mutuo de cristales en expansión dificulta su crecimiento y se retarda debido a que la cantidad de líquido disponible, es cada vez menor (ver figura 7.2), debido a que los cristales comienzan a tocarse, dificultando su libertad de crecimiento, de modo que el líquido remanente se solidifica en la forma de cristales adyacentes, hasta que termina la solidificación.

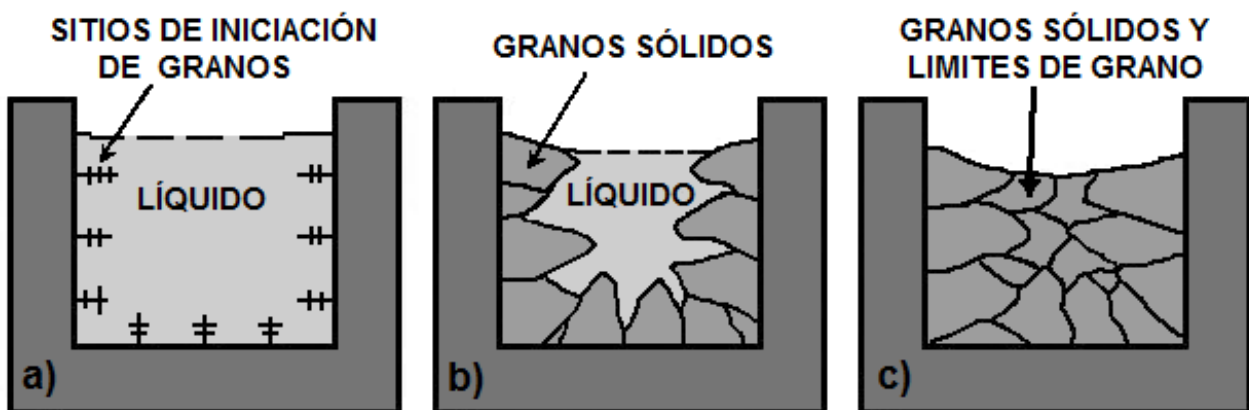


Figura 7.2. Proceso de solidificación de los metales, a) formación inicial de los granos, b) continuación de la solidificación y c) solidificación completa y límites de grano (18, 74)

El segundo aspecto es el proceso de crecimiento del cristal, ya que mientras está rodeado de líquido, éste suele tener forma regular, pero al encontrarse dos frentes de cristalización con una ubicación espacial diferente, esta forma se altera, y la forma final dependerá de las condiciones del contacto con los cristales vecinos, en donde la velocidad del proceso de cristalización está determinada cuantitativamente por la velocidad de formación de los núcleos de cristalización (número de cristales que se generan por unidad de tiempo) y la velocidad de crecimiento de los cristales (velocidad con la que aumentan las dimensiones lineales de un cristal). La fase final resultante de una soldadura se da, no solamente en los procesos que ocurren en las masas fundidas al solidificar, sino también en las transformaciones en estado sólido, por generación y crecimiento de cristales. Ahora el sólido se compone de cristales individuales, usualmente en orientaciones diferentes. El encuentro de los cristales entre sí es denominado límite de grano (ver figura 7.3). Es importante saber que la velocidad de enfriamiento y la temperatura del metal, ya que tiene gran influencia en la estructura y en el tamaño de grano.

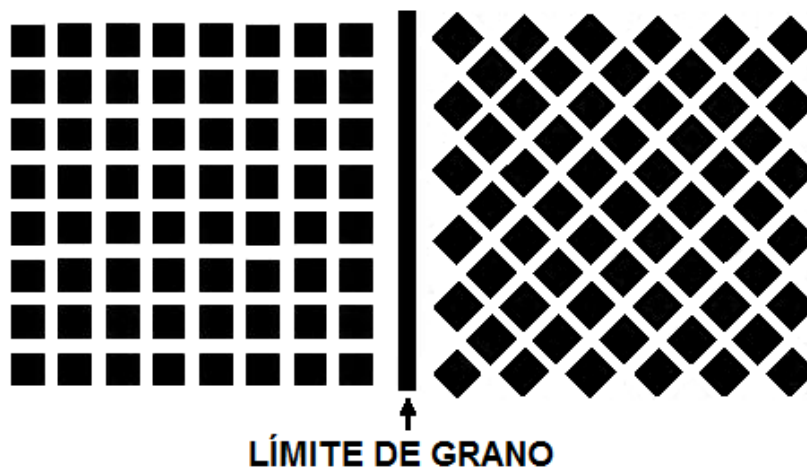


Figura 7.3. Modelo de límites de grano (18, 74)

La transformación de sólido a líquido está gobernada por un proceso combinado de nucleación y crecimiento de cristales, en donde el tamaño, orientación y distribución de los granos producidos define las propiedades mecánicas y la sanidad de la estructura solidificada. Cada grano se inicia en un núcleo a partir del cual se produce el crecimiento. Durante el proceso de soldadura, la formación de los primeros cristales se inicia en puntos

de menor temperatura de la zona soldada. Ese punto se sitúa en la zona donde el metal fundido y el metal base no fundido se encuentran. En general, cuanto mejor sea el “mojado” del líquido en el sustrato, más efectivo será inicio del proceso de nucleación. En la soldadura, el mojado es muy bueno, ya que el sustrato contiene granos parcialmente fundidos del metal de base, a partir de los cuales se produce la solidificación del metal líquido. Con la continuación del proceso de solidificación, puede ser observado que los granos en el centro del cordón de soldadura son menores y poseen una textura más fina que los granos localizados en los límites exteriores del depósito de soldadura, esto se puede ver en la figura 7.4.

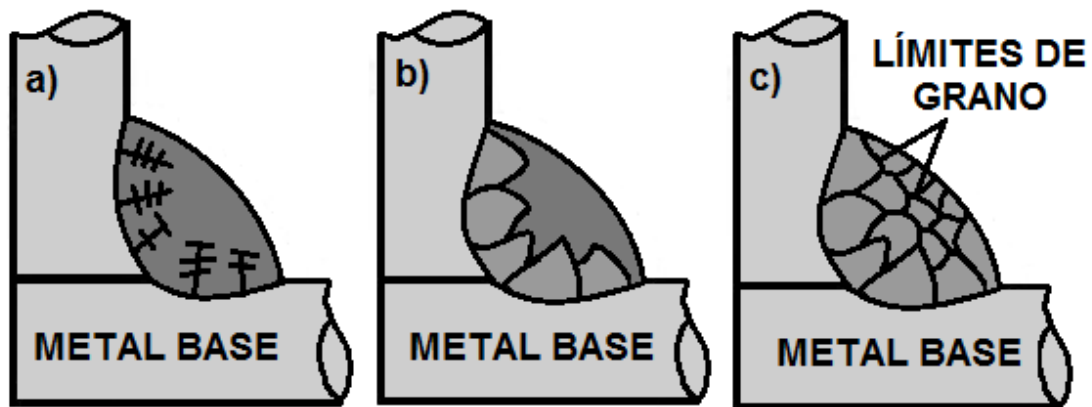


Figura 7.4. Proceso de solidificación de una junta soldada, a) formación de dendritas, b) iniciación de formación de cristales y c) solidificación completa (18, 74)

El fenómeno de solidificación ocurre en la medida que el metal del charco de soldadura se enfría; el calor del centro del depósito de soldadura se disipa en dirección del metal base, a través de los granos más externos que se solidificaron primero. Consecuentemente, esos granos ya en el estado sólido, permanecen más tiempo a altas temperaturas, lo que favorece su crecimiento. El tamaño de grano puede tener efecto en la integridad de la soldadura, en el sentido de que granos pequeños son más resistentes y más dúctiles que los granos grandes. En caso de que aparezca una grieta, la tendencia es que ella se inicie en el área donde los granos son mayores. El crecimiento de los cristales se da con la misma orientación cristalina que los granos de metal base parcialmente fundidos, **este fenómeno recibe el nombre de crecimiento epitaxial**. La solidificación epitaxial es el mecanismo

común a todos los procesos de soldadura por fusión, posibilitando la *coalescencia* para tener continuidad entre el metal base y el metal de soldadura. Durante el crecimiento de estos granos iniciados epitaxialmente, se produce una selección de unos a expensas de otros, formándose una textura de crecimiento. Este crecimiento competitivo se produce debido a que cada grano posee direcciones preferenciales de crecimiento. Por lo tanto, los granos que poseen esa orientación, o cercana a ella, tendrán mayor chance de sobrevivir. La característica epitaxial de la solidificación aparece también en cada pase de una soldadura multi pasada. En la figura 7.5 se observa el crecimiento epitaxial de los granos.

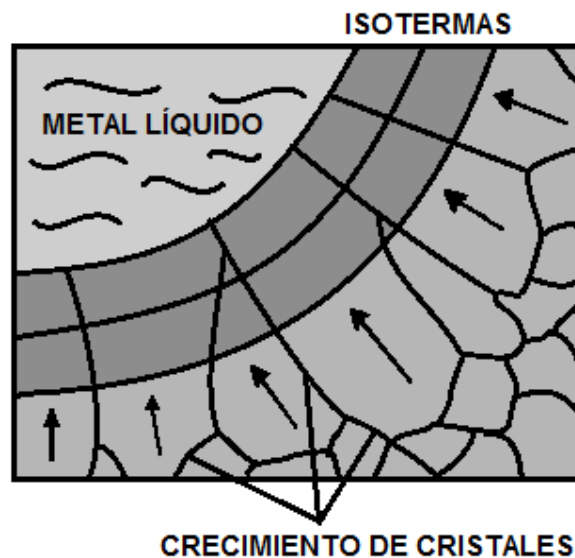


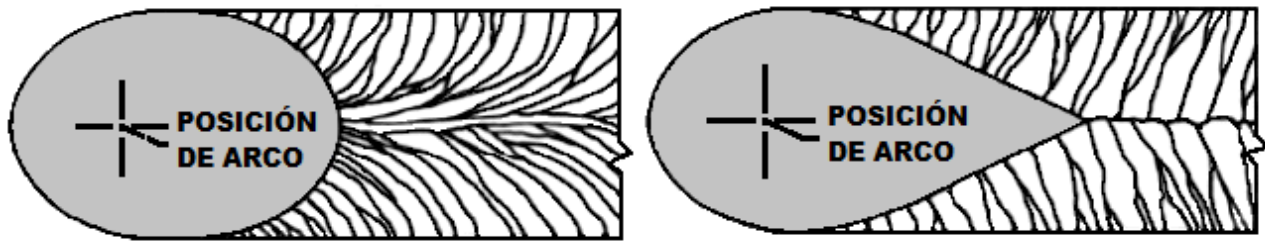
Figura 7.5. Esquema de crecimiento epitaxial de los cristales al solidificar (70, 71)

Muchos fenómenos singulares que afectan las propiedades mecánicas de una aleación, a bajas y a altas temperaturas, ocurren en los límites de grano, donde el ordenamiento de los átomos es irregular. Existen muchos vacíos o átomos ausentes en los límites de grano. Los espacios entre los átomos pueden ser mayores que el normal, permitiendo que átomos individuales se desplacen con relativa facilidad. Por causa de eso, la difusión de los elementos (o movimiento de los átomos individuales), a través de la red cristalina del solvente, generalmente ocurre más rápidamente en los límites de grano que en su interior. Debido al desorden resultante, se hace más fácil para los átomos grandes ser segregados en los límites de grano. Tales segregaciones llevan frecuentemente la formación de fases indeseables que afectan adversamente las propiedades del metal, como reducción de la

ductilidad o aumento de la susceptibilidad al agrietamiento durante el proceso de soldadura o tratamiento térmico. Se puede concluir, que metales con tamaño de grano fino poseen generalmente mejores propiedades mecánicas, para servicio a temperatura ambiente y a bajas temperaturas. Por otro lado, metales con grano grueso, presentan generalmente mejor desempeño a altas temperaturas y que la forma y las características de los granos son determinadas por el arreglo de sus átomos. El arreglo atómico de un elemento puede cambiar a diferentes temperaturas, siendo que ese arreglo atómico o la microestructura determinan las propiedades de los metales (18, 27, 70).

7.5.1. Efecto de la geometría del charco de fusión o pileta líquida

Tanto el proceso de soldadura como los parámetros de aplicación del cordón de soldadura, influyen en la geometría del cordón, microestructura, el tamaño de grano y zona afectada térmicamente, entre otras. La forma de la pileta líquida o charco de fusión queda determinada por la velocidad de avance del cordón de soldadura así como por el balance entre el calor aportado y las condiciones de enfriamiento. Si la velocidad es baja, la pileta tiende a tomar una forma elíptica, mientras que si la velocidad aumenta, la pileta tiende a alargarse en forma de gota. En resumen, la forma del charco de fusión determina la dirección de crecimiento de los granos, así como la velocidad de crecimiento y el gradiente térmico en el líquido. **Cuando la pileta de fusión tiene forma de gota**, el gradiente térmico máximo permanece casi invariable en su dirección en todos los puntos del frente de solidificación, desde el borde hasta el eje del cordón. El resultado es que cualquier grano favorablemente orientado es capaz de crecer a una velocidad óptima y expandirse a expensas de los menos favorablemente orientados, alcanzando el centro del cordón de soldadura un número relativamente pequeño de granos. **Cuando la pileta de fusión es elíptica**, la dirección de gradiente máximo cambia continuamente desde el borde hacia el centro del cordón. En consecuencia, la mayor parte de los granos se encuentra, aunque por poco tiempo, en condiciones favorables para crecer y permanecen hasta la línea central del cordón (38, 70, 71). En la figura 7.6, se observa un modelo del crecimiento de los cristales en función del gradiente térmico.



a) Charco de fusión en forma elíptica b) Charco de fusión en forma de gota

Figura 7.6. Modelos de crecimiento de los cristales al solidificar en función del gradiente térmico (70, 71)

7.6. Tratamientos térmicos en uniones soldadas

Como fue mencionado antes, cuando se aplica un cordón de soldadura, se involucran procesos de fusión, solidificación, crecimiento de grano y de cristales, transformaciones de fases, difusión, cambios de temperatura entre otros. El tipo de proceso de soldadura indica o determina la forma como estos procesos ocurren. Para conseguir la fusión de los bordes a unir y el metal de aporte si lo hay, la fuente de calor se aplica de forma muy localizada. Así que en la zona de fusión se unen los bordes y se introduce calor a la pieza, pero a medida que se avanza, se produce la solidificación por enfriamiento de la zona inmediatamente posterior. Durante la aplicación del cordón de soldadura, el calor aportado se disipa radicalmente alejándose de la fuente. Como el charco metálico lleva una velocidad de avance se forman isotermas de forma aproximadamente elípticas alrededor de la fuente de calor (18, 71).

El intervalo de temperaturas por las que pasa cada punto puede dar lugar a las transformaciones que afectan las características de la unión soldada, estas características depende de numerosos factores como la geometría de la unión soldada, temperatura de precalentamiento, espesor de la pieza, calor aportado por el proceso de soldadura, que influyen en la estructura metalúrgica, propiedades mecánicas, en la sanidad de la unión soldada y que permite adoptar ciertas precauciones para reducir los efectos perjudiciales. Un buen control del ciclo térmico de la soldadura, permite lograr cordones sanos, sin que se

produzcan alteraciones de las propiedades de los metales después de soldados. El calor introducido a la pieza a través del cordón de soldadura provoca varios efectos perjudiciales como son: (18)

- Altas tensiones residuales, provenientes del calentamiento localizado que causan las tensiones de contracción, las cuales pueden conllevar a la distorsión de la pieza.
- Reducción de la ductilidad y cierta fragilización en el cordón de soldadura y en la zona afectada térmicamente que puede conducir a la fisuración.
- Deterioro de las propiedades de mecánicas, principalmente en la zona afectada térmicamente.
- Que el cordón de soldadura no tenga las propiedades requeridas debido a ciclos térmicos desfavorables.

7.7. Zonas metalúrgicas involucradas en una unión soldada

La respuesta del cordón de soldadura y el área próxima a la línea de fusión, en una junta soldada, depende de la naturaleza del material soldado y del proceso de soldadura empleado. Se presentan tres zonas bien definidas después de aplicar el cordón de soldadura y en la figura 7.8 se observan estas tres zonas de la unión soldada (18).

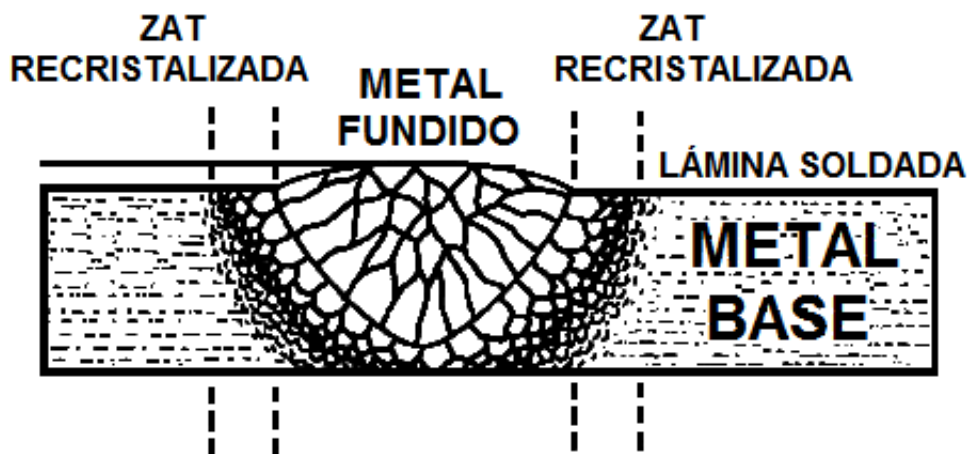


Figura 7.8. Esquema de las zonas involucradas en un cordón de soldadura (8, 18)

Zona de fusión: Es la zona donde el metal de soldadura fue depositado; es la parte del metal que se fundió y después solidificó durante el proceso de soldadura. Esta zona puede

estar compuesta de metal base fundido, metal de aporte o una mezcla de metal de aporte y metal base (18).

Zona afectada térmicamente: Durante el ciclo térmico de soldadura se genera una zona estrecha no equilibrada o zona afectada térmicamente (ZAT). Es la parte del metal adyacente a la zona de fusión, que ha sido calentada durante el proceso de soldadura, hasta una temperatura que puede producir algunos cambios metalúrgicos significativos. Estos cambios pueden ser crecimiento de grano, revenido del metal, endurecimiento o incluso la fragilización del material. La ZAT experimenta temperaturas máximas de calentamiento que van desde justo por encima de A_{c1} hasta cerca de la temperatura de fusión T_m , y se enfría a temperatura ambiente en pocos minutos. Las sub capas existentes dentro de toda la ZAT se dividen en zona afectada térmicamente de grano grueso (ZATGG), zona afectada térmicamente de grano fino (ZATGF) y zona afectada térmicamente de efecto intercrítico (ZATIC) según las temperaturas máximas alcanzadas (18, 75, 76).

Metal base: Es todo el material metálico que no fue afectado por el calor aportado en el proceso de soldadura y su estructura metalúrgica permanece igual (18).

Como las partes más críticas en la soldadura son la zona afectada térmicamente y la zona de fusión, estas se estudiarán con más detalle.

7.7.1. Zona afecta térmicamente (ZAT)

Como el ciclo térmico durante la soldadura es muy rápido, los materiales más afectados serán aquellos que aumentan su resistencia por tratamiento térmico. Esta zona está compuesta por el metal base que ha sido calentado por encima de $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ y por debajo del punto de fusión del metal, donde una parte de esta zona ha sido calentada por encima de la temperatura de austenización y el metal ha sido transformado en austenita de manera parcial o total. Por lo tanto, muchos procesos metalúrgicos que se producen lentamente a temperatura ambiente, que dependen de la difusión en estado sólido, pueden ocurrir muy rápidamente a temperaturas próximas a la de liquidus (18, 70). Al enfriarse esta zona, después del proceso de soldadura, las propiedades van a quedar determinadas, en gran

parte, por la velocidad de enfriamiento de la austenita y la transformación de esta a fases de menor temperatura según los diagramas TTT. Como consecuencia de lo anterior, en la ZAT se puede tener varios tipos de estructuras con diferentes propiedades, debido a que en esta zona se tienen diferentes porcentajes de austenización, los cuales son enfriados a distintas velocidades, por tal motivo las propiedades finales serán función de la cantidad de austenita formada y de la velocidad de enfriamiento. La zona afecta térmicamente en los aceros y aleaciones, es muy importante con relación a las propiedades de la unión.

Las condiciones como se realiza la soldadura tienen efectos sobre la velocidad de enfriamiento, debido a que un aumento en la entrada de calor, implica calentar más el metal base y la zona afectada térmicamente se ampliará, además se aumentará la velocidad de enfriamiento, favoreciendo la formación de estructuras duras. Un calentamiento del metal base reduce el gradiente de temperatura y por ello se disminuye la velocidad de enfriamiento, alejando la posibilidad de obtener estructuras duras, aunque con el precalentamiento la zona afectada térmicamente es mayor, pero con estructuras más blandas y dúctiles. Con el poscalentamiento de la junta se alivian tensiones residuales en las zonas de formación martensítica y bainítica, dándole mayor ductilidad a la ZAT, pero este tratamiento no elimina las grietas que se pueden formar debido a la contracción del metal en zonas de alta dureza y fragilidad. Desde el punto de vista de soldabilidad, la ZAT es más crítica y se debe poner mayor atención, incluso que la zona de fusión del metal (18, 70). Veamos los efectos del calor de soldadura en la ZAT, para algunos tipos de aleaciones que aumentan su resistencia por trabajo en frío. Debido a que los materiales endurecidos por trabajo en frío recrystalizarán (conforman nuevamente su estructura cristalina) cuando son llevados a temperaturas de transformación austenítica, debemos esperar cambios importantes en la resistencia de la ZAT. Originalmente los granos estarán alargados y aplastados, producto del trabajo en frío. Luego, en algún punto de la ZAT, el metal alcanza la temperatura necesaria para recrystalizar, apareciendo pequeños granos equiaxiales en la microestructura. En la línea de fusión, además de la recrystalización, se producirá un crecimiento de grano significativo. Por lo tanto, en este caso la resistencia se verá sensiblemente disminuida, y finalmente la resistencia de la junta será del orden de la chapa

en estado recocido. En resumen, las propiedades conferidas con el trabajo en frío se verán disminuidas.

El crecimiento de granos en la zona afectada térmicamente degrada significativamente las propiedades mecánicas de la unión soldadura, ya que disminuye la resistencia a la fractura de la unión soldada y su dureza. Además durante la soldadura de pases múltiples, la parte más degradada de la ZAT (zona afectada térmicamente) es la de grano grueso, la cual ha sido recalentada. Por lo anterior, tanto para la soldadura de pase único como para la soldadura de pases múltiples, hay refinamiento de grano y se debe mejorar para aumentar la resistencia de la ZAT. Las tecnologías para el refinamiento de granos se enfocan en cambiar el constituyente de los materiales base y los materiales de soldadura mediante la adición de Mg y/o Ca al acero, ya que estos elementos forman óxidos y/o sulfuros muy finos con tamaños de 10 nm a 100 nm, los cuales pueden dispersarse en el acero, de modo que el crecimiento del grano en una ZAT se retarda y los granos se refinan. Otra tecnología que refina los granos de la ZAT es mediante el uso de inclusiones de B, N y Ca como sitios de nucleación o por inclusiones de TiN. Ambas técnicas refinan los granos de ZAT al cambiar la composición química de los materiales, por lo que no pueden ser adoptados ampliamente en la soldadura. (77). La ZAT para las aleaciones que aumentan su resistencia por transformación martensítica es fuertemente afectada por la cantidad de carbono y los elementos de aleación que pueden formar estructuras martensíticas con el rápido enfriamiento de la soldadura. Estos pueden ser aceros templados y revenidos previamente a la soldadura, o simplemente aceros con la composición adecuada para obtener estructuras de temple, aunque previamente no hayan sido tratados. La figura 7.9 muestra la variación de la temperatura máxima que se alcanza en diversos planos de la ZAT de un empalme soldado sobre un acero con 0,35 % C. Gran parte de esta zona se ha calentado a temperaturas superiores a A1.

Punto 1 - se ha calentado a más de 1320 °C. La austenita formada será de grano grueso por cuanto a esa temperatura los granos de austenita crecen.

Punto 2 - se ha calentado a 1100 °C y se ha austenizado totalmente. No ha tenido lugar el crecimiento de grano y sí puede haber afinamiento de granos.

Punto 3 - se ha calentado exactamente por encima de A_3 , temperatura que no es suficientemente elevada como para homogeneizar por completo a la austenita.

Punto 4 - esta zona se ha calentado aproximadamente a $760\text{ }^\circ\text{C}$, que está comprendida entre A_1 y A_3 . Parte de la estructura se transforma en austenita y la mezcla de estructuras resultante, durante el enfriamiento, puede degradar las propiedades de impacto de la junta.

Punto 5 - esta zona se ha calentado a $650\text{ }^\circ\text{C}$ que es inferior a A_1 , y por lo tanto no ha habido transformación austenítica. El metal base conservará su estructura de ferrita y cementita pero se habrá ablandado.

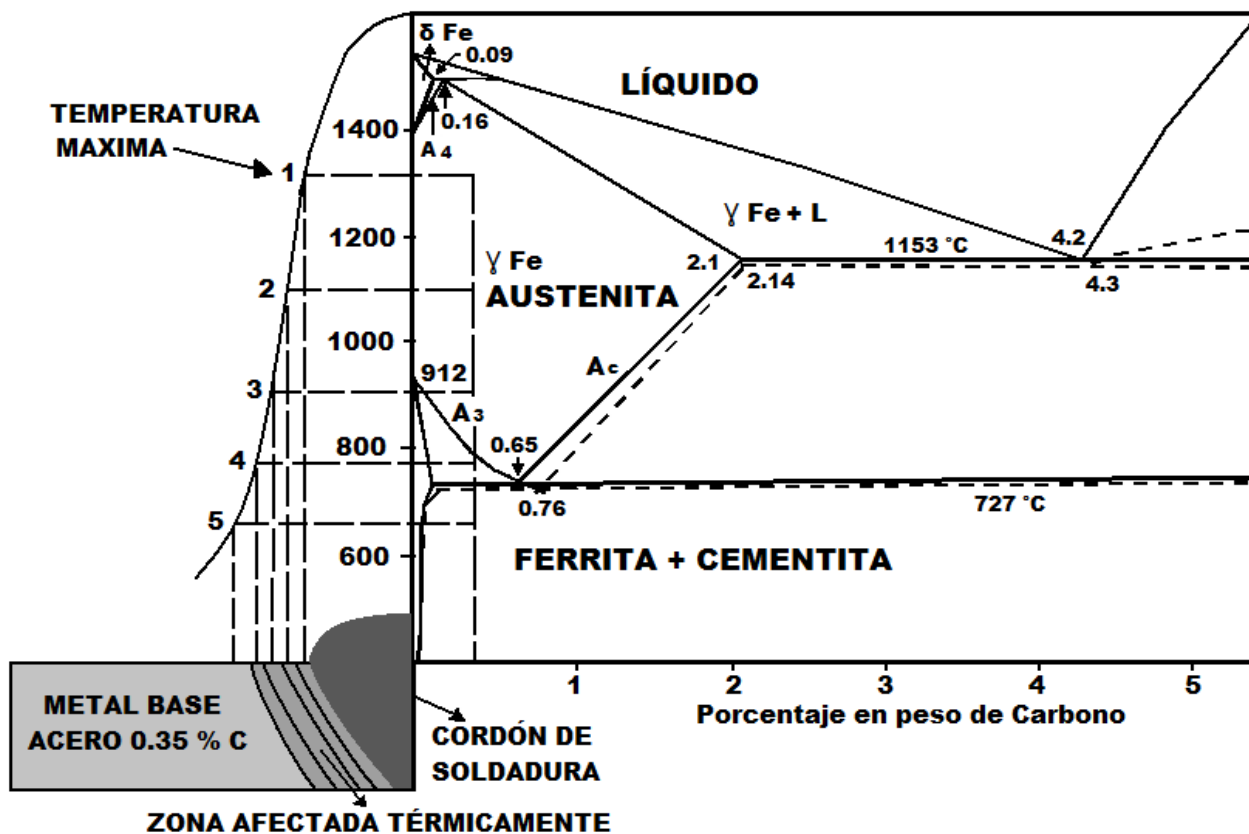


Figura 7.9. Esquema de la correlación entre temperaturas generadas durante el proceso de soldadura y su relación con el diagrama Hierro - Carbono (3, 8)

Estas zonas parciales de la ZAT pueden presentar múltiples estructuras con propiedades diferentes entre sí. Las condiciones de soldadura que influyen en el enfriamiento, son:

1. La energía de arco: Una mayor energía (joules/pulgada) provoca menores velocidades de enfriamiento. El uso de electrodos de menor diámetro, una menor corriente de soldadura y una mayor velocidad de avance, son factores concurrentes para reducir la energía de arco y con ello incrementar las velocidades de enfriamiento.

2. El espesor del metal base: Por lo general, un metal base de mayor espesor se enfría más rápidamente que otro más fino. La mayor capacidad para absorber el calor, relacionada con su mayor masa, producen mayores velocidades de enfriamiento.

3. Temperatura del metal base (precalentamiento): La temperatura del metal base, al iniciar la soldadura, tiene fuerte efecto sobre las velocidades de enfriamiento en toda la zona afectada por el calor y en el cordón de soldadura; a mayor precalentamiento corresponden menores velocidades de enfriamiento, pero mayor zona afectada térmicamente.

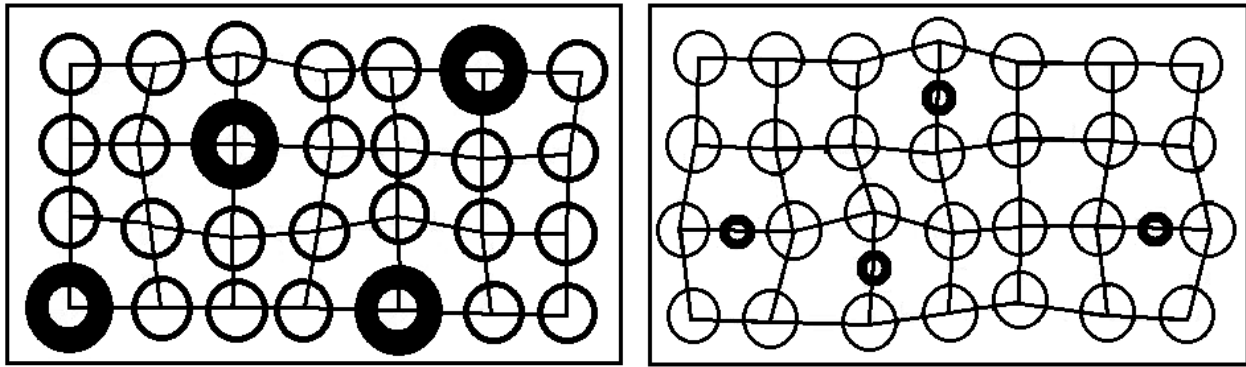
7.7.2. El metal de fusión

El metal de fusión es la aleación que se forma con el metal de aporte y los bordes fundidos del metal base, donde las características metalúrgicas y la calidad del metal de fusión, dependen de la composición química del metal de aporte y del metal base, de las reacciones químicas durante la fusión de los metales, del ciclo de enfriamiento del metal de fusión y de la temperatura a la que alcance tanto la zona diluida, como en la ZAT, según el diagrama hierro – carbono mostrado en la figura 7.9. El grado de dilución (porcentaje de metal base y metal de aporte aleados en el cordón de soldadura), es función de la entrada de calor y está controlada por el amperaje (fuente eléctrica), o tipo de llama (fuente oxi-gas), a su vez, una mayor dilución, implica una mayor penetración del metal de fusión en el metal base (18, 70). Para el proceso por arco eléctrico, cuando no hay una alta penetración, se considera que el cordón de soldadura está compuesto por un 80 % del metal de aporte y 20 % de metal base. Si el metal de soldadura debe igualar las propiedades del metal base, el metal de aporte debe ser escogido cuidadosamente. El control de la atmósfera de la soldadura es importante, ya que el oxígeno, hidrógeno y nitrógeno del aire, se disuelven con facilidad en el acero fundido, por tal motivo, una protección inadecuada conlleva a la absorción de estos

gases por parte del metal fundido, lo que significa que se fragiliza el cordón de soldadura y puede ocasionar su agrietamiento. La fragilización por hidrógeno también puede provenir del recubrimiento del electrodo. Los electrodos y varillas tienen un contenido bajo de carbono, ya que si el metal de aporte es bajo en carbono, se minimiza la posibilidad de obtener estructuras duras y frágiles en el metal de fusión, por otro lado, el metal de fusión es muy sensible al agrietamiento cuando se encuentran presentes elementos como el azufre y el fósforo. Si la soldadura se realiza sin metal de aporte se dice que es autógena, estas soldaduras dependen de la calidad del metal base y están sujetas a porosidades y agrietamientos, ya que no existen elementos desoxidantes y escorificadores que se obtienen normalmente en el metal de aporte (18, 70).

7.8. Elementos aleantes en el acero

Alear es el proceso de adicionar un metal o un no metal a los metales puros tales como cobre, aluminio o hierro. Desde que se descubrió que las propiedades de los metales puros podían ser mejoradas adicionándose otros elementos, los aceros aleados son cada vez más utilizados. Por otro lado, los metales que son soldados raramente están en estado puro. Las propiedades más importantes que pueden ser mejoradas por la adición de pequeñas cantidades de elementos de aleación son la dureza, la resistencia mecánica, la ductilidad y la resistencia a la corrosión. Algunas variables importantes de los elementos de aleación y que afectan directamente las propiedades son la cantidad, el tamaño y la posición dentro de la estructura cristalina. En general, los elementos de aleación hacen las veces de *solutos*, los cuales pueden quedar localizados en la matriz del metal predominante en alguna de las de los siguientes maneras, si el tamaño de los átomos de soluto es parecido a los átomos del solvente, ellos ocupan los sitios de la red substituyendo algunos de los átomos de la matriz, Por otro lado, si los átomos de soluto son suficientemente pequeños, ellos ocupan los espacios intersticiales entre los átomos del solvente. En el primer caso se habla de átomos substitucionales y la aleación formada se conoce como solución sólida substitucional (figura 7.10.a), y en el segundo caso se habla de átomos intersticiales, en cuyo caso la aleación formada se conoce como solución sólida intersticial (figura 7.10.b) (18).



a) Substitucional

b) Intersticial

Figura 7.10. Posición de los elementos aleantes dentro de la red cristalina en función del tamaño (18, 78)

7.8.1. Efecto de los elementos de aleación en los aceros

Los aceros, además del carbono, tienen otros elementos de aleación para mejorar sus propiedades físicas y químicas, además que permiten una mayor amplitud en el proceso de tratamiento térmico. Por consiguiente, estos elementos de aleación influyen en la soldabilidad de los aceros. El efecto de los principales elementos de aleación adicionados a los aceros se resume a continuación (18).

Carbono (C): Una aleación que contenga hasta 2,0 % de carbono en combinación con el hierro es denominada acero, mientras que la combinación con porcentajes de carbono mayores de 2,0 % es conocida como hierro fundido. Sin embargo así el carbono sea un elemento de aleación deseable, porcentajes altos pueden causar problemas; por eso, es necesario un cuidado especial cuando se soldan aceros de alto porcentaje de carbono y hierro fundido. También, el carbono es el elemento de aleación más eficiente y económico. Este elemento estabiliza la austenita y es formador de carburos. Aumenta la templeabilidad, la resistencia y la dureza del acero (18).

Fósforo (P): Se considera como elemento perjudicial en los aceros y se trata de minimizar su contenido, ya que reduce la ductilidad y la resistencia al impacto. Sin embargo, en algunos aceros se agregan pequeñas cantidades para aumentar su resistencia a la tensión y

mejorar la maquinabilidad, pero tiene un efecto perjudicial en el conformado en frío y la tenacidad a baja temperatura (18).

Azufre (S): Se considera como elemento perjudicial en los aceros y se trata de minimizar su contenido. El azufre es un elemento indeseable desde el punto de vista de la soldadura y su efecto perjudicial es minimizado con la adición de manganeso. Los aceros con altos contenidos de azufre son difíciles de soldar y se recomienda usar electrodos básicos para que absorban el azufre del baño y lo mantengan en la escoria, disminuyendo la porosidad en la soldadura (18).

Manganeso (Mn): Está presente en casi todas las aleaciones de acero y constituye uno de sus elementos básicos. El Manganeso es formador de austenita y al combinarse con azufre previene la formación de sulfuro de hierro en los bordes del grano, siendo un agente desulfurante y desoxidante. Sin embargo, si el contenido de manganeso es superior a 1%, el acero se clasifica como un acero aleado al manganeso y aumenta la capacidad de endurecimiento del acero y reduce el intervalo crítico de temperaturas (18).

Silicio (Si): Este elemento se adiciona como agente desoxidante en todos los aceros. Cuando se adiciona a aceros de muy baja cantidad de carbono, produce un material frágil con baja pérdida por histéresis y alta permeabilidad magnética. El uso principal del silicio es junto con otros elementos de aleación, como manganeso, cromo y vanadio, estabilizadores de carburos. Es un formador de ferrita y aumenta la capacidad de endurecimiento mejorando las propiedades mecánicas del acero. En consumibles de soldadura es algunas veces adicionado para aumentar la fluidez del metal de soldadura (18).

Cromo (Cr): Es un formador de ferrita y aumenta la profundidad de endurecimiento, además aumenta la resistencia mecánica a altas temperaturas y a la oxidación. El Cromo es un elemento principal de aleación en aceros inoxidable y debido a su capacidad de formar carburos, se utiliza en revestimientos o recubrimientos duros de gran resistencia al desgaste, ya que origina la formación de diversos carburos de cromo, que son muy duros y sin embargo, el acero resultante es más dúctil que un acero de la misma dureza, producido simplemente al incrementar su contenido de carbono. La adición de cromo amplía el intervalo crítico de temperatura (18).

Níquel (Ni): Es el principal formador de austenita, este elemento aumenta la tenacidad y resistencia al impacto, por eso es el elemento más efectivo para mejorar la resistencia del acero a bajas temperaturas, sin disminuir la ductilidad. El níquel también se utiliza en los aceros inoxidable para aumentar la resistencia a la corrosión. El cromo se utiliza con frecuencia junto con el níquel para obtener la tenacidad y ductilidad proporcionadas por el níquel, y la resistencia al desgaste y la dureza que aporta el cromo. El níquel presenta propiedades únicas para soldar hierros fundidos. La adición de níquel al acero amplía el nivel crítico de temperatura (18).

Molibdeno (Mo): Aumenta fuertemente la profundidad de endurecimiento del acero, así como su resistencia al impacto, por eso es el elemento más afectivo para mejorar la resistencia del acero a bajas temperaturas. El molibdeno forma carburos y también se disuelve en la ferrita hasta cierto porcentaje, de modo que intensifica su dureza y la tenacidad. En los aceros inoxidable austeníticos mejora la resistencia a la corrosión (18).

Vanadio (V): Promueve la formación de ferrita, carburos, grano fino, es un fuerte desoxidante y aumenta la tenacidad del acero, además tiene la capacidad de endurecimiento por solución en la ferrita y la austenita, que aumenta la resistencia al desgaste en los aceros; por lo anterior, este elemento se utiliza ampliamente en aceros para herramientas (18).

Cobre (Cu): Es un estabilizador medio de la austenita y en cantidades del 0,25% aproximadamente, incrementa la resistencia al desgaste, y en bajas cantidades como 0.5%, no perjudica la soldabilidad de los aceros, además mejora la resistencia a la corrosión de aceros al carbón (18).

Boro (B): Se utiliza básicamente para aumentar el endurecimiento en el acero. Una pequeña cantidad de boro, tiene un efecto muy marcado en el endurecimiento del acero, que imparten al acero características de revestimiento duro (18).

Columbio (Nb): Se utiliza básicamente en aceros inoxidable austeníticos con el objeto de estabilizar los carburos y aumentar la resistencia a la corrosión en los inoxidable (18).

Tungsteno (W): Se utiliza para impartir tenacidad y dureza por medio de una estructura densa y fina, además de conservar estas propiedades a alta temperatura. El Tungsteno forma carburos los cuales son excepcionalmente duros, dándole al acero una alta resistencia

al desgaste, lo cual lo hace apto para aplicaciones de revestimiento duro o en aceros para herramientas (18).

Cobalto (Co): Es un elemento que tiene una ligera tendencia a formar carburos, es un débil estabilizador de la austenita, disminuya la templabilidad y es poco usado en los aceros, aunque encuentra su aplicación, en donde se requiere de un revestimiento duro para servicio a alta temperatura, ya que disuelto en la ferrita o la austenita produce una gran efecto endurecedor (18).

Nitrógeno (N): Es un potente estabilizador de la austenita y puede agregarse a los aceros inoxidables austeníticos para reducir la cantidad de níquel.

Aluminio (Al): Se usa principalmente como desoxidante del acero. Además disminuye el crecimiento del grano al formar óxidos dispersados y nitruros (18).

7.9. Propiedades del metal en el charco de soldadura

El acero recién solidificado continúa enfriándose y se producen transformaciones de fase en estado sólido que dan origen a la llamada **estructura secundaria**. Las transformaciones de fase en estado sólido tienen una importancia tecnológica fundamental en los aceros, ya que permiten obtener diferentes propiedades mecánicas según sea el tratamiento térmico al que es sometido un material de una composición química dada. Durante la soldadura de un acero, el enfriamiento se produce en forma continua, dependiendo del material, proceso, espesor de las chapas, calor aportado, precalentamiento, temperatura entre pases, etc. Las velocidades de enfriamiento involucradas determinan las condiciones para las transformaciones de fase mencionadas sean de no equilibrio. Por esta razón, no es posible utilizar los diagramas de fase de equilibrio y se recurre entonces a los Diagramas TTT (temperatura-transformación-tiempo). Durante el enfriamiento, los productos de la descomposición de la austenita aparecen en distintas proporciones, dependiendo tanto de su estado inicial (composición química, tamaño de grano, heterogeneidad, etc.), como del tratamiento térmico a que se la somete durante la transformación. Estos elementos estructurales, sumados a los provenientes de la estructura primaria, y que no se transforman, constituyen la estructura secundaria del metal de soldadura (18).

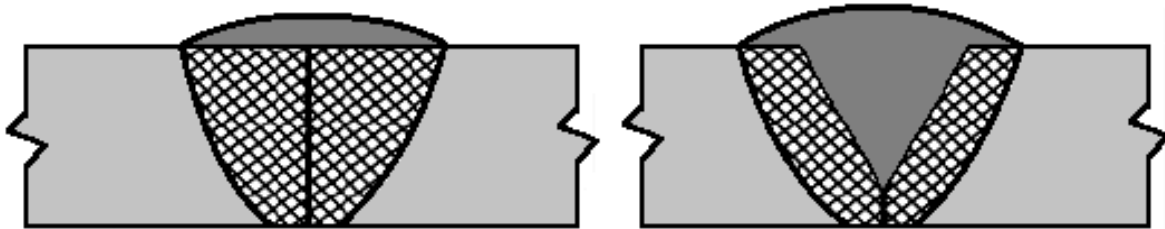
7.9.1. Charco de fusión y dilución

Sería ideal si el metal de soldadura propiamente dicho y la zona afectada por el calor tuvieran exactamente las mismas propiedades y características que las del metal de base. Sin embargo, eso no es posible, porque el metal de aporte es fundido, mientras que la mayoría de los metales base es utilizada en el estado forjado o laminado. Se sabe que los materiales conformados siempre presentan mayor resistencia, ductilidad y tenacidad que los materiales directamente obtenidos del estado fundido. El metal de soldadura puede ser considerado una miniatura de un fundido que es rápidamente enfriado, y sus propiedades frecuentemente se asemejan a las de un material conformado. Esa es particularmente la situación con metales ferrosos, sin embargo, la combinación de propiedades es menos satisfactoria en algunos metales no ferrosos como aleaciones de aluminio y de cobre (18).

Por causa de las fuerzas electromagnéticas del arco, dependiendo del tipo de junta, de la corriente de soldadura y del ángulo que la boquilla o el electrodo hacen con la línea de la soldadura el pozo de fusión se mueve internamente en varios modelos de flujo. Esa turbulencia resulta en una uniformidad de temperatura y composición dentro del metal líquido, con excepción de la región más caliente en las inmediaciones de la raíz del arco. La composición final del metal de soldadura es el resultado de una mezcla del metal del electrodo o metal de adición fundido con el metal base que es también fundido. El metal depositado del electrodo o del metal de adición, es denominado "diluido" por el metal base fundido. Cuando ningún metal es adicionado, por lo que el metal de soldadura es completamente formado de metal base, la dilución es definida como 100 %. En la soldadura manual con electrodo revestido, en el pase de raíz puede tener 30 % de dilución y los pases subsecuentes tendrán una dilución ligeramente menor. Como resultado de la uniformidad del metal de soldadura, es posible calcular su composición, se las proporciones de metal base y de electrodo fundido pudieran ser estimadas. Eso puede ser hecho frecuentemente de una observación de la sección recta de la pieza soldada, como lo muestra la figura 7.11. (18). Tales cálculos, que involucran únicamente proporciones simples, son importantes cuando es utilizado un electrodo o metal de adición de composición diferente de la del

metal base, como en juntas disímiles, como por ejemplo cuando se realiza un revestimiento inoxidable sobre un acero al carbono. A veces es necesario considerar la dilución, si el metal base tuviera alto contenido de azufre o tuviera aluminio que, si es adicionado al pozo de fusión, puede afectar el contenido de oxígeno y perjudicar la tenacidad del depósito de soldadura. Con ayuda de la figura 7.11, la dilución puede ser calculada como: (18)

$$\% \text{ dilución} = \frac{\text{área de la parte achurada}}{\text{área del cordón de soldadura}} \times 100 \quad (7.6)$$



a) Junta a tope con bordes rectos

b) Junta a tope con preparación en V

Figura 7.11. Estimación de la dilución a partir de la geometría de la soldadura: (a) junta a tope; (b) junta con chaflan en V (18, 78)

7.9.2. Aporte térmico o aporte de calor

La mayoría de los procesos de soldadura por fusión son caracterizados por la utilización de una fuente de calor intensa y localizada. Esta energía concentrada puede generar, en pequeñas regiones, temperaturas elevadas, altos gradientes térmicos, variaciones bruscas de temperatura y, consecuentemente, extensas variaciones de microestructura y propiedades en un pequeño volumen de material. En la soldadura de arco eléctrico el aporte térmico (*heat input*), es definido como el calor cedido a la unión soldada por unidad de ancho y es calculado por la ecuación: (18)

$$\text{Aporte térmico} = \frac{\text{Voltaje} \times \text{corriente}}{\text{Velocidad de soldado}} \quad (7.7)$$

Al considerar varias de las unidades usualmente empleadas para definir el aporte térmico, se puede decir que: (18)

$$Aporte\ térmico\ (kJ/mm) = 0,06 \times \frac{\text{Voltaje (V) x corriente (A)}}{\text{Velocidad de soldado (mm/min)}} \quad (7.8)$$

o

$$Aporte\ térmico\ (kJ/mm) = 0,006 \times \frac{\text{Voltaje (V) x corriente (A)}}{\text{Velocidad de soldado (cm/min)}} \quad (7.9)$$

Después de la soldadura, la disipación de calor ocurre principalmente por conducción en la pieza, desde regiones de mayor temperatura hacia el metal restante. (18)

7.9.3. Ciclo térmico durante la soldadura

La variación de la temperatura en diferentes puntos de la pieza durante la soldadura puede ser estimada en la forma de una curva denominada ciclo térmico de soldadura (ver figura 7.12). Los puntos más próximos de la junta sufrirán una variación de temperatura debido al paso de la fuente de calor. La curva de la figura 7.12 presenta los siguientes puntos importantes: (18)

T_p: temperatura de pico, que es la temperatura máxima alcanzada en el punto. T_p disminuye con la distancia al centro de la soldadura e indica la extensión de las regiones afectadas por el calor de soldadura. (18)

T_c: temperatura crítica, que es la temperatura mínima para que ocurra una alteración relevante, como por ejemplo, una transformación de fase. (18)

T₁ y T₂: son temperaturas por debajo de la temperatura crítica y que no alcanzan a ocasionar transformaciones de fases.

tp: tiempo de permanencia arriba de una temperatura crítica, que es el tiempo en que el punto queda sometido a temperaturas superiores a una temperatura crítica; (18)

Δt: Tiempo de enfriamiento de la pieza.

La velocidad de enfriamiento es dada por: (18)

$$v = \frac{T_1 - T_2}{\Delta t} \quad (7.10)$$

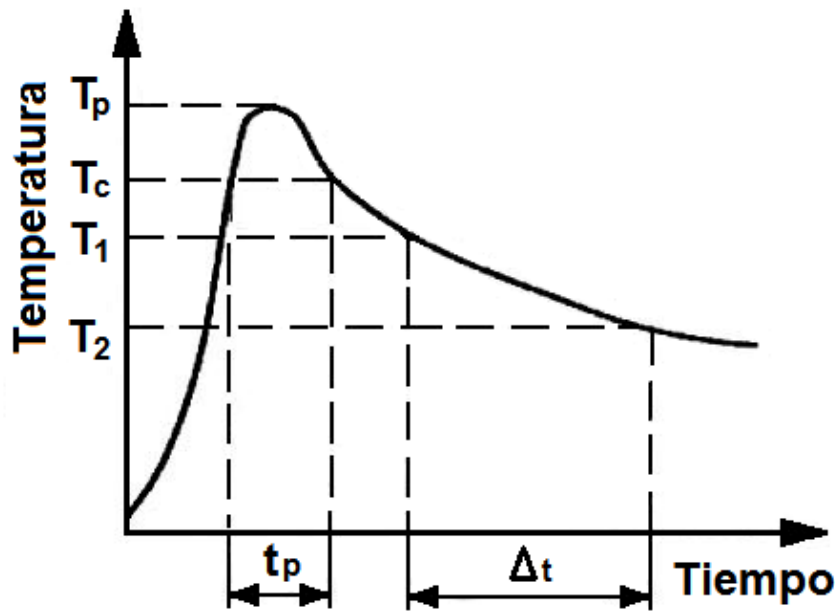


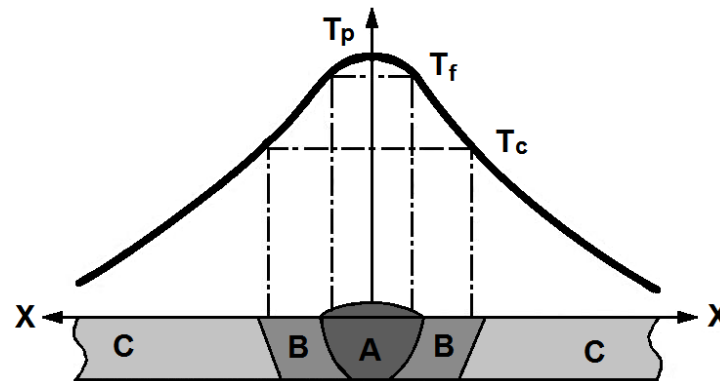
Figura 7.12. Ciclo térmico durante la soldadura (18, 73)

79.4. Distribución térmica

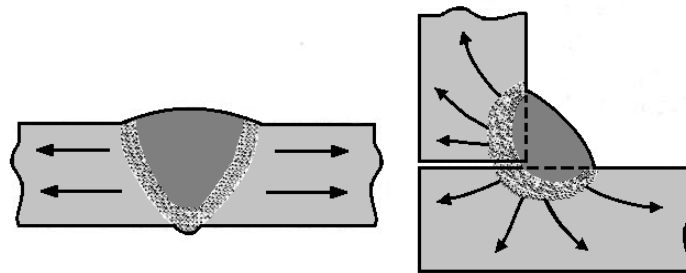
Si se considera el ciclo térmico de cada punto próximo a la junta, se puede decir que la temperatura de pico (T_p), de cada punto, varía con su distancia al centro del cordón de soldadura. Colocando en la forma de gráfico las temperaturas pico en función de la distancia al cordón de soldadura, se obtiene una curva esquemática semejante a la exhibida en la figura 7.13 a. Esta curva es conocida como distribución o repartición térmica (18). Los ciclos térmicos de soldadura y la repartición térmica son principalmente dependientes de los siguientes parámetros: (18)

- Tipo de metal base, relativamente a su conductividad térmica, pues cuanto mayor la conductividad térmica del metal, mayor es su velocidad de enfriamiento.
- Geometría de la junta (una junta en T posee tres direcciones para el flujo de calor, mientras una junta a tope posee únicamente dos (ver figura 7.13 b); por eso juntas en T se enfrían más rápidamente que juntas a tope para las mismas condiciones de soldado.
- El espesor de la junta aumenta con la velocidad de enfriamiento hasta un espesor límite; arriba de ese límite, la velocidad de enfriamiento no depende del espesor.

- La velocidad de enfriamiento disminuye con el aumento del aporte térmico y de la temperatura inicial de la pieza y consecuentemente la repartición térmica se hace más amplia.



a) Repartición térmica de una soldadura.



b) Dirección del flujo de calor en juntas a tope y en T.

Figura 7.13. Distribución térmica en la soldadura (18, 74)

7.10. La estructura del metal de soldadura

En cordones de soldadura de aceros carbono y carbono-manganeso los granos columnares son bordeados por la ferrita y frecuentemente existen plaquetas de ferrita creciendo a partir de los límites de grano. Ese tipo de microestructura presenta baja tenacidad, y en caso de ser necesario modificarla, el método usual es el tratamiento térmico de normalizado. Por otra parte, en una soldadura multipases cada cordón de soldadura es tratado térmicamente por el cordón subsecuente. El metal que es calentado arriba de la franja de temperatura de transformación se recrystaliza en granos equiaxiales de menor tamaño. La profundidad hasta donde ocurre la recrystalización depende de muchos factores, incluyendo la temperatura entre pases, siendo rara la ocurrencia de recrystalización completa (ver figura 7.14). (18).

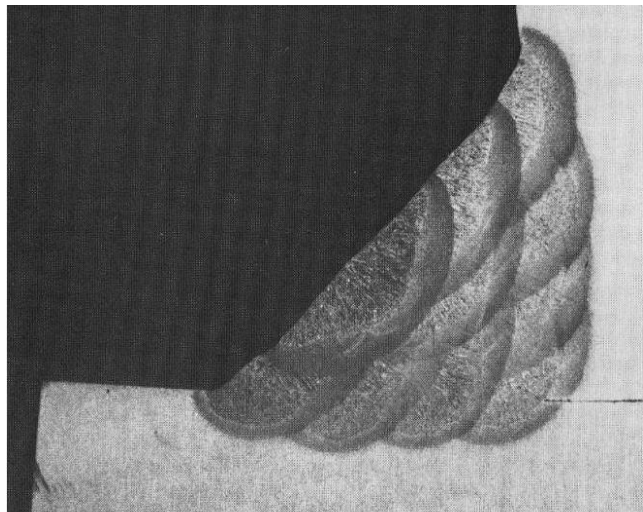


Figura 7.14. Recristalización de cordones de soldadura por pases subsecuentes depositados con electrodo revestido en una junta multipases (18, 74)

El recalentamiento también refina la microestructura en las partes adyacentes a la zona térmicamente afectada. Una región crítica en la cual la tenacidad es deseable es la parte superior de la soldadura, visto que la última capa a ser depositada en una soldadura multipases puede no recibir el beneficio del tratamiento de la recristalización. Es preciso un planeamiento cuidadoso del cordón final (o de los cordones finales), para asegurar que ocurra el refinado de los granos donde fuera necesario (18).

Puede ocurrir pérdida de tenacidad en la zona térmicamente afectada de aceros estructurales, que está asociada con altos aportes térmicos que causan crecimiento de grano y alteraciones microestructurales. Siempre que la tenacidad fuera importante, como en estructuras que necesitan mantener su integridad a bajas temperaturas de servicio, debe ser evitada la técnica de soldado de cordones anchos como se muestra en la figura 7.15 a, por lo que se da preferencia a la técnica de cordones angostos como se muestra en la figura 7.15 b). En aceros templados, calentamientos y enfriamientos rápidos pueden crear una capa dura de martensita al lado del cordón de soldadura. Un cuidadoso planeamiento de la secuencia de los pases finales puede reducir la dureza del metal depositado (18). Hay materiales diferentes a los aceros al carbono que no presentan cambios de fase en el estado sólido y que no sufren refinado de grano durante el soldado por medio de multipases. Sin

embargo, otras alteraciones pueden ocurrir durante el recalentamiento de los cordones de soldadura, tales como licuefacción o fusión de películas de bajo punto de fusión en los límites de grano, formando grietas durante la solidificación. Eso puede suceder durante la soldadura multipases de aceros inoxidable austeníticos (18).

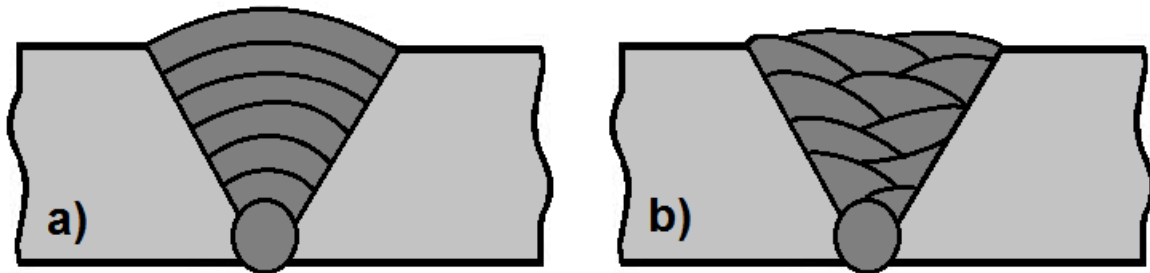


Figura 7.15. Técnicas de soldadura de cordones (a) anchos y (b) angostos (18, 74)

7.11. Ejercicios de metalurgia de soldadura

1. Calcule la temperatura de precalentamiento para soldar a tope una lámina de acero ASTM A 572 grado 60 de 1 in de espesor. Su composición química es 0,26 % de C, 1,35 % de Mn, 0,04 % máx. de P, 0,05 % máx. de S, 0,4 % de Si.

Se calcula el carbono equivalente en función de la composición (Cq):

$$Cq = 0,26\%C + \frac{1,35\%Mn}{6} = 0,485$$

Después se calcula el carbono equivalente total (CE):

$$CE = 0,485(1 + 0,005 * 25,4) = 0,546$$

Se finaliza calculando la temperatura de precalentamiento (Tp):

$$Tp = 350\sqrt{(0,546 - 0,25)} = 190^{\circ}C$$

2. Calcule la temperatura de precalentamiento para soldar a tope un acero AISI 4140 de ½ in de espesor. Su composición química es 0,43 % de C, 1 % de Mn, 0,035 % máx. de P, 0,04 % máx. de S, 0,35 % de Si, 1,1 % de Cr y 0,25 % de Mo.

Se calcula el carbono equivalente en función de la composición (Cq):

$$Cq = 0,43\%C + \frac{1\%Mn}{6} + \frac{1,1\%Cr}{10} - \frac{0,25\%Mo}{50} = 0,701$$

Después se calcula el carbono equivalente total (CE):

$$CE = 0,701(1 + 0,005 * 12,7) = 0,745$$

Se finaliza calculando la temperatura de precalentamiento (Tp):

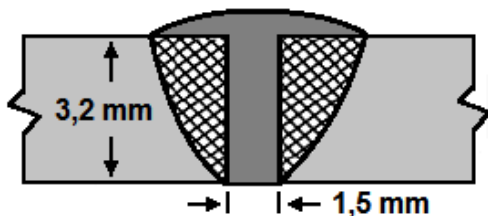
$$Tp = 350\sqrt{(0,745 - 0,25)} = 246^{\circ}C$$

3. Calcule el aporte térmico en KJ/mm de un electrodo que aplica a 120 A y 25 V, con una velocidad de soldeo de 190 mm/min.

Solución:

$$\text{Aporte térmico (kJ/mm)} = 0,06 \times \frac{25 \text{ (V)} \times 120 \text{ (A)}}{190 \text{ (mm/min)}} = 0,947 \text{ (kJ/mm)}$$

3. Calcule el porcentaje de dilución de un cordón de soldadura a tope sin bisel de una platina de 3,2 mm de espesor, la cual tiene una separación de 1,2 mm. El refuerzo representa un 20 % del cordón de soldadura. La zona achurada es de 5,9 mm².



Se calcula el área del cordón de soldadura:

Zona achurada 5,9 mm².

Rectángulo de metal de aporte:

1,2 mm x 3,2 mm = 3,84 mm².

La suma de estas dos zonas representa el 80 % de la soldadura que es: 9,74 mm².

Se calcula el refuerzo:

9,74 → 80 %

X ← 20% X = 2,43 mm²

$$\% \text{ dilución} = \frac{5,9 \text{ mm}^2}{12,17 \text{ mm}^2} \times 100 = 48,47 \%$$

8. SOLDABILIDAD

La AWS define la soldabilidad, como la capacidad de un metal o combinaciones de metales para ser soldados bajo las condiciones de fabricación, dentro de una estructura específica, convenientemente diseñada y para desempeñarse satisfactoriamente después en servicio. El término soldabilidad relaciona todos los aspectos necesarios que debe tener el metal para que se produzca un buen cordón de soldadura y no afectar las propiedades mecánicas de la zona afectada térmicamente. Los materiales pueden tener buena soldabilidad, bajo un conjunto de condiciones específicas, pero esta puede bajar, si no se tienen en cuenta las condiciones como se realiza la soldadura. Para que se produzca un buen cordón de soldadura se debe mejorar la soldabilidad, teniendo en cuenta un buen diseño de la junta, una buena selección del metal de aporte, precalentamiento y postcalentamiento del metal base, control de la entrada de calor y de su disipación durante el proceso de soldadura, debido a que si no se tiene un buen manejo de los parámetros anteriores, se puede encontrar defectos en la soldadura. La determinación del metal base (tipo de aleación), es muy importante para la selección de los parámetros de la soldadura (18). La soldabilidad de los metales y aleaciones está determinada por las propiedades metalúrgicas del metal base. La composición química y los tratamientos térmicos, también influyen en la soldabilidad, al igual que las dimensiones y la forma de la pieza, el metal de aporte y la sensibilidad del metal de soldadura a la dilución con metales de bases heterogéneas. La dilución se lleva a cabo por mezcla del metal de aporte y el metal base. Si el metal de soldadura no puede tolerar la mezcla del metal base, hay poca soldabilidad, donde el porcentaje de dilución del metal de soldadura depende de la entrada de calor, del proceso de soldadura y de la configuración de la junta a ser soldada. Cuando el metal base no puede soportar los ciclos de calentamiento y enfriamiento impuestos por la soldadura y se agrieta, se dice que el material tiene poca soldabilidad (18). El calor producido para fundir el cordón de soldadura es poco, en comparación con la cantidad de metal base y por esto el calor es disipado rápidamente por el metal base frío, enfriando rápidamente el cordón de soldadura, estos cambios bruscos en la temperatura hacen que la estructura del metal sufra dilataciones y

contracciones que pueden afectar seriamente sus propiedades, debido a los esfuerzos que se producen y que pueden conducir a deformaciones plásticas en las cercanías de la soldadura, además durante el ciclo de calentamiento del proceso de soldadura, pueden ocurrir cambios físico - químicos y metalúrgicos (18). Cuando las características metalúrgicas y físico – químicas del cordón de soldadura y el material base son poco apropiadas o indeseables, con respecto a la soldabilidad, estas pueden ser corregidas, utilizando una protección adecuada con gases de protección, fundentes específicos, metal de aporte apropiado, proceso de soldadura y en algunos casos con precalentamiento, postcalentamiento y tratamientos térmicos postsoldadura. Los parámetros más influyentes en la soldabilidad de los aceros son el contenido del carbono equivalente y la velocidad de enfriamiento, debido a que ellos determinan la posibilidad del endurecimiento en la zona afectada térmicamente, por el temple o el crecimiento de grano. El temple en la zona afectada térmicamente es dado por el rápido enfriamiento por conducción de calor del metal base, el cual se puede evitar o minimizar precalentando la pieza en la zona de la soldadura o calentando totalmente la pieza, ya que esto disminuye la velocidad de enfriamiento. El crecimiento de grano se debe a la formación de estructuras gruesas que tienen menor ductilidad que las estructuras finas (18). Los aceros con carbono equivalente bajo tienen alta soldabilidad, aunque para seleccionar el proceso de soldadura y el metal de aporte adecuado, se deben tener en cuenta otros factores como el diseño de la junta, el espesor y la forma de la pieza, entre otros. La disminución de la soldabilidad de los materiales al incrementar el contenido de carbono equivalente y la velocidad de enfriamiento, se da por los cambios en el rango de solidificación y la tendencia al endureciendo por la aparición de fases duras y frágiles como la martensita (18).

8.1. Entrada de calor

La entrada de calor es la cantidad de energía introducida, por longitud del cordón de soldadura, desde una fuente de calor en movimiento, como puede ser un arco eléctrico y se calcula en J/cm o BTU/pulg. La entrada de calor que proviene de un arco eléctrico está dada por: (18)

$$H = \frac{E * I}{v} * 60 \quad (8.1)$$

Donde:

H : es la cantidad de energía liberada por cm de soldadura, expresada en J/cm.

E : es la tensión de arco, expresada en voltios.

I : es la intensidad de corriente del arco, expresada en amperios.

V : es la velocidad de avance de la soldadura, expresada en cm/min.

60: es un factor para unificar las unidades.

De la energía liberada por el arco, sólo una parte se utiliza para efectuar la soldadura y el resto se consume o se pierde por conducción, convección, radiación de la columna del arco y por chisporroteo, entonces la entrada neta de calor es: (18)

$$Hn = f1 \frac{E * I}{v} * 60 \quad (8.2.)$$

Donde f1 es la eficiencia en la transferencia de calor. Esta eficiencia es baja para procesos de soldadura como el GTAW, mejorado en el proceso de soldadura SMAW y alcanzando los mayores resultados en los procesos de soldadura modernos como el plasma (PAW), soldadura por rayo láser (EBW), y el CMT (Cold metal transfer). Algunos de los valores típicos para los procesos de soldadura más conocidos son: 0,7 para GTAW, 0,9 para SMAW, GMAW y FCAW y 1,0 para SAW. Es necesario mantener un buen control de la entrada de calor mientras se aplica el cordón de soldadura. En la práctica, cuando se requiere controlar la entrada de calor en procesos como el SMAW, se fijan E e I y se exigen cordones de soldadura dentro de un rango de longitud, para cada electrodo depositado. Además, al aumentar el amperaje y voltaje, se aumenta la entrada de calor aplicado y a mayor velocidad de avance, menor es el calor aplicado, la energía aplicada y la velocidad de avance influyen en el tamaño del cordón de soldadura y en el tamaño de la zona afectada térmicamente (18).

8.2. Aspectos importantes de la soldabilidad

El proceso de soldadura que se esté ejecutando, debe asegurar que no cambie las propiedades mecánicas de los materiales que son soldados y que tampoco dé lugar a la transformación de estructuras frágiles, esto debido al aumento de tensiones o cambio de fases en la unión soldada. Para tener una buena soldabilidad, se debe tener en cuenta la soldabilidad operativa, la cual está relacionada con la operación de la soldadura y estudia las condiciones de realización de las uniones; la soldabilidad estructural, que trata la rigidez de la unión de soldadura y depende del espesor del metal a soldar; y la soldabilidad metalúrgica es la más importante y la de mayor interés, esta trata de los cambios estructurales originados por las modificaciones en la composición durante y después del proceso de soldadura y trae como consecuencia los cambios de las propiedades mecánicas y metalúrgicas del material.

8.3. Pruebas de soldabilidad

El objetivo de las pruebas de soldabilidad es la selección de procesos de soldadura apropiados para soldar una determinada pieza o estructura, buscando un buen desempeño en servicio. Estas pruebas de soldabilidad pueden ser para dos objetivos (18).

- Para determinar el comportamiento del metal ante varios procesos de soldadura, es decir, evaluar el efecto de los procesos de soldadura sobre las propiedades y la sanidad de la junta soldada bajo diferentes grados de restricción.
- Para buscar un método práctico de evaluación del grado de restricción impuesto por los procesos de soldadura, para el diseño de la estructura que se está fabricando.

La soldabilidad del material y de los procesos de soldadura puede ser complicada, debido a la gran cantidad de variables como la temperatura de precalentamiento, postcalentamiento, tratamiento térmico postsoldadura, entrada de calor, velocidad de avance, composición química, propiedades mecánicas del metal base, secuencia de la soldadura, diseño de la junta y requerimientos estructurales en servicio. Una forma de simplificar lo anterior, es

considerar dos o más variables al mismo tiempo, ya que en muchos casos se puede predecir el comportamiento del material o del proceso de soldadura (18). La evaluación de la soldadura se hace para examinar los cambios metalúrgicos en la microestructura del metal base o en la zona afectada térmicamente. La evaluación se realiza por medio de análisis metalográfico, además de pruebas mecánicas para observar el comportamiento del metal base, la zona afectada térmicamente y el cordón de soldadura, con pruebas de dureza, de doblez, prueba de tensión. Si la estructura debe realizar trabajos especiales como exposición a bajas temperaturas, radiación nuclear, fuerte corrosión entre otros, se requiere de ensayos especiales (18).

8.3.1. Análisis metalográfico

Se realiza el análisis metalográfico de la sección transversal de la soldadura para obtener información de cómo quedó el cordón después del proceso: El análisis metalográfico no revela la calidad, pureza y estructura del metal depositado en la soldadura, sin embargo, la estructura metalúrgica de la zona afectada térmicamente, da información del efecto de la velocidad de enfriamiento. Con el análisis metalográfico es posible detectar microgrietas, fases presentes, tamaño de grano, microsegregación e inclusiones en el cordón de soldadura y la zona afectada térmicamente, además se puede observar la limpieza de los límites de grano, ya que pueden presentar sulfuros y otros constituyentes de bajo punto de fusión. Es sabido que los materiales de grano fino tienen mejores propiedades mecánicas a bajas temperaturas y los materiales con grano grueso son preferidos para el servicio a altas temperaturas (18).

8.3.2. Pruebas mecánicas

En la unión soldada se determinan algunas propiedades mecánicas, en probetas cortadas y maquinadas de placas de prueba, elaboradas para calificar un determinado proceso. Las pruebas son realizadas según la norma AWS B-30-41 o según los requerimientos de la sección IX del código ASME, los cuales contemplan ensayos de tracción del metal de

soldadura y de la junta, pruebas de doblez para evaluar la sanidad del metal de la soldadura y de la junta, normalmente se requieren pruebas de cara, raíz y de lado de la soldadura. La prueba de dureza se puede realizar en la sección transversal de la zona afectada térmicamente y el cordón de soldadura, debido a que hay una correlación entre esta propiedad y la resistencia a la tensión. Esta prueba se limita a materiales que tienen cambios en la dureza, debido al ciclo de temperatura en la zona afectada térmicamente durante la soldadura; por ejemplo los aceros ASTM A 514 y A 517 (18).

8.3.3. Identificación de los metales

Es frecuente, especialmente cuando se hacen trabajos de reparación, que un soldador tenga que identificar de manera general el tipo de material base, para poder seleccionar el metal de aporte y el procedimiento de soldadura más apropiado. Esto significa que el soldador debe tener varios métodos confiables, precisos y rápidos para identificar los metales. Entre las principales pruebas que un soldador puede utilizar de manera sencilla y rápida, se tienen: (18, 32, 79)

Prueba visual: La apariencia o aspectos de la superficie del metal, tales como el color y el brillo, ayudan a diferenciarlo y clasificarlo, también el metal que ha sido fundido en arena tiene una superficie rugosa y las piezas que han sido forjadas tienen un aspecto superficial escamoso y rugoso con diseños simples (18, 33, 79).

Prueba magnética: Por medio de un imán se puede separar tres grupos de materiales. Los fuertemente magnéticos, que son los aceros de bajo carbono, aceros inoxidables ferríticos y martensíticos. Los ligeramente magnéticos, que son las aleaciones con alto contenido de níquel y las aleaciones de monel (70 %Ni – 30 %Cu), aunque algunas aleaciones de este tipo no son magnéticas. Los no magnéticos, que son las aleaciones de cobre, aluminio, zinc, algunas modificaciones del monel y el acero inoxidable austenítico (18, 33, 79).

Prueba del ácido: En una superficie libre de mugre, grasa, pinturas y óxidos se aplica una gota de ácido nítrico concentrado, el cual no ataca el acero inoxidable, pero produce un óxido de color verde o azul verdoso en el monel y el cupro níquel y un color café en el acero al carbono (18, 33, 79).

Prueba de chispa: La mayoría de los metales ferrosos se pueden diferenciar y clasificar, en forma aproximada, en cuanto a su contenido de carbono, observando las chispas producidas del material en contacto con un esmeril en marcha y se comparan las chispas, con las de una pieza que se le conozca su contenido de carbono. Por otro lado, se debe tener cuidado a la hora de hacer la comparación, ya que el tratamiento térmico realizado en la pieza, puede modificar el aspecto de la chispa (18, 35, 79). Esta práctica requiere de experiencia para clasificar los metales, ya que hay que tener en cuenta la longitud, el color y la forma de la chispa, desde el momento que sale de la rueda de esmeril hasta que desaparece. Es conveniente conservar muestras de metales conocidos para visualizar las chispas y hacer pruebas comparativas (Ver figura 8.1) (18, 33, 79).

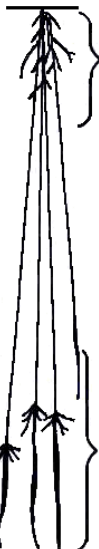







HIERRO DULCE	ACERO DE BAJO CARBONO	ACERO DE ALTO CARBONO	ACERO ALEADO
 <p>COLOR AMARILLO</p> <p>COLOR BLANCO</p>	 <p>COLOR BLANCO</p>	 <p>COLOR BLANCO</p>	 <p>COLOR AMARILLO</p> <p>COLOR BLANCO</p>
FUNDICION BLANCA, HIERRO	FUNDICION GRIS, HIERRO	HIERRO MALEABLE	NIQUEL
 <p>COLOR ROJO</p> <p>COLOR AMARILLO</p>	 <p>COLOR ROJO</p> <p>COLOR AMARILLO</p>	 <p>COLOR AMARILLO</p>	 <p>COLOR ANARANJADO</p>

Figura 8.1. Comportamiento de la chispa en diversos materiales metálicos (18, 79)

Prueba de lima: Esta prueba consiste en realizar un limado en sentido transversal a la dirección más larga de la pieza, después un examen visual de la región limada de la superficie permitirá apreciar numerosas líneas que cruzan las marcas de la lima si el material es hierro maleable, en cambio no se observan las marcas si es acero vaciado, además con el limado se puede estimar que tan duro es el material (18, 35, 79).

Historial de la pieza: Conocer de dónde proviene la pieza y qué trabajo estaba realizando, da una aproximación del tipo de material con que está hecha (18, 33, 79).

La superficie de fractura: La superficie de fractura revela aspectos como la naturaleza de la rotura, el tipo de grano y el color. La superficie de una fractura de una pieza de fundición gris, por ejemplo, es de color gris oscuro y generalmente al frotarla con el dedo deja una untura negra de grafito, la fundición blanca, su fractura tiene un aspecto blanco plateado, la fundición maleable muestra un centro oscuro con una película exterior clara debida al tratamiento superficial. Así que la forma como rompe un material da información valiosa, en cuanto al tipo de comportamiento que este presenta, es decir, si es dúctil o frágil, por ejemplo la superficie de fractura de una fundición maleable, hace intuir que estos materiales son dúctiles y esto se comprueba con el hecho de que generalmente se deforman antes de romperse y el metal indicará su estado dúctil a lo largo del borde de rotura. Por otro lado, las fundiciones gris y blanca son frágiles y producen una fractura limpia. La superficie del acero da una superficie de fractura con un grano bien definido, además el color de la superficie del acero de bajo carbono es gris brillante y la del acero de alto contenido de carbono en un poco más oscura.

8.4. Soldabilidad de algunas aleaciones

8.4.1. Soldabilidad de los aceros de alta aleación

Son aceros de alta calidad, con buenas propiedades mecánicas y con alta resistencia a la corrosión, oxidación y buena ductilidad a alta temperatura. La mayoría de los aceros de alta aleación incluyen los aceros inoxidable y los aceros para herramientas, los primeros resisten la oxidación a alta temperatura y al ataque de muchos medios corrosivos, por otro

lado contienen porcentajes de cromo mayores al 12 % y ciertas cantidades de níquel, además de otros elementos de aleación para propósitos especiales. Los aceros para herramientas cumplen propósitos de alta exigencia mecánica, como corte de materiales, por lo que su deterioro, por esta acción mecánica es muy común. Los tipos básicos de estos aceros son aceros austeníticos, ferríticos, martensíticos, los duplex (de estructura compuesta por ferrita y austenita), y los aceros endurecibles por precipitación. Los aceros martensíticos tienen la mayor cantidad de carbono y pueden presentar estructuras bastantes duras (18). Los aceros inoxidable pueden ser soldados fácilmente con el proceso de soldadura por arco, donde el charco de soldadura debe estar protegido de la oxidación atmosférica por fundentes, escoria o gases de protección, para retener los elementos de aleación y excluir todos los contaminantes que afectan la resistencia a la corrosión y la calidad del cordón. Por otro lado, los problemas que presentan los aceros inoxidable son el agrietamiento en caliente, agrietamiento en frío, formación de la fase sigma y precipitación de carburos. Los revestimientos y los fundentes empleados en estos aceros contienen fluoruro de calcio, sodio y potasio que ayudan a retirar la capa de óxido de la superficie a soldar. Cuando se emplean procesos de soldadura con protección gaseosa TIG o MIG, se requiere de una limpieza más rigurosa, ya que no hay fundente que ayude a eliminar la capa de óxido de cromo durante la soldadura, en algunos casos es conveniente pasivar la soldadura con ácido nítrico al 10 % o 20 % para que no se corra la junta soldada (18).

8.4.1.1. Soldabilidad de aceros inoxidable martensíticos

Estos aceros contienen entre 11,5 % y 18 % de cromo como su principal elemento de aleación. Cuando se van a soldar estos aceros (de comportamiento autotemplable), se debe tener mucho cuidado, debido a que pueden producir tensiones que generan agrietamiento en caliente, el cual se presenta a menudo en este tipo de acero en la zona afectada térmicamente y en el cordón de soldadura, por causa del alto contenido de carbono 0,15 % – 1,2 %, que los hacen altamente templables formando martensita, la cual es una estructura de baja ductilidad y frágil que puede agrietar al material. Por tal motivo se requiere un cuidadoso tratamiento de precalentamiento entre 250 °C y 350 °C y un poscalentamiento

del orden de altas temperaturas de revenido, o sea entre 600 °C y 760 °C, para prevenir el agrietamiento. Los electrodos deben tener una composición similar al metal base en caso de tratamiento térmico posterior. Siempre que sea posible se recomienda soldar con metal de aporte aleaciones austeníticas, para que absorban las tensiones generadas durante el proceso de soldadura y así evitar las grietas (18).

8.4.1.2. Soldabilidad de aceros inoxidables ferríticos

Los aceros inoxidables ferríticos contienen entre 13 % y 25 % de cromo, su estructura es 100 % ferrítica y no contiene austenita. La fase ferrítica es magnética en las aleaciones Fe-Cr y esta existe hasta la fusión del metal y no se produce austenita durante el calentamiento. Son aleaciones esencialmente no templables, aunque pueden formar pequeñas cantidades de austenita en los límites de grano, que pueden producir martensita durante el enfriamiento desde la temperatura de austenización. Presentan buena soldabilidad, aunque cuando se les calienta tienden a fragilizarse por la aparición de la fase sigma que es dura y frágil. Si el nivel de esfuerzos residuales es alto, pueden sufrir agrietamiento en la soldadura, por lo tanto se recomienda el uso de los electrodos austeníticos (18).

8.4.1.3. Soldabilidad de aceros inoxidables austeníticos

Los aceros inoxidables austeníticos contienen por lo menos 23 % de cromo y otros elementos de aleación como níquel, molibdeno, titanio y columbio, para mejorar la resistencia a la corrosión y la oxidación, y para que mantengan su alto nivel de propiedades mecánicas a alta temperatura. El carbono incrementa las propiedades mecánicas a altas temperaturas, pero disminuye la resistencia a la corrosión, debido a la formación del carburo de cromo. Como estas aleaciones no reciben tratamiento térmico, no se pueden endurecer por el enfriamiento brusco en la zona afectada térmicamente. Estos aceros tienen una alta soldabilidad, sin embargo hay ciertas precauciones que se deben tener en la zona afectada térmicamente y en el cordón de soldadura, para obtener un cordón sano. En la práctica se recomienda pasar una tela húmeda, después de aplicado y solidificado el cordón

de soldadura, para que se enfríe rápidamente y disminuir la posibilidad de formar la fase sigma y que el cromo forme carburos (18). Se debe controlar la presencia de carbono en el metal de aporte, fundente, escoria o gas de protección, debido a que este elemento disminuye la resistencia a la corrosión de estos aceros, además, la humedad en el recubrimiento de los electrodos y en el fundente para el proceso por arco sumergido, se debe mantener lo más bajo posible, debido a que esta humedad puede producir porosidad en el cordón de soldadura. Se debe retirar la escoria con grata de acero inoxidable y se trabajan los electrodos con un 15 % menos de amperaje que los electrodos de acero al carbono (18).

Para asegurar que la estructura del cordón de soldadura tenga una resistencia a la corrosión similar o mayor al metal base, el metal depositado en el cordón de soldadura generalmente es más rico en cromo y níquel que el metal base, además hay que tener en cuenta el contenido de carbono, el cual debe ser bajo. Según la AWS, los recubrimientos recomendados son los de bajo hidrógeno y de tipo básico como los, EXXX – 15, EXXX-16 y EXXX-17 (18).

El agrietamiento en caliente de la soldadura es generada por la segregación de constituyentes de bajo punto de fusión en los límites de grano, lo que conlleva a la rotura intergranular, cuando son aplicados esfuerzos de tensión o de compresión. El mayor responsable de este problema es el azufre en forma de sulfuros, donde el efecto tiende a incrementarse con la presencia de níquel y silicio. Este problema es predominante en los aceros totalmente austeníticos. Para reducir este agrietamiento en el cordón de soldadura, se le adiciona elementos de aleación para que formen pequeñas cantidades de ferrita en los límites de grano, con lo que se aumenta el área de estos y se previene la aparición de películas continuas en dichos límites de grano (18). Para mantener una alta soldabilidad de estos aceros, se requiere que la ferrita se encuentre en pequeñas cantidades entre 5 % a 10 %, debido a que el aumento de esta fase ferrítica en el acero, aumenta la posibilidad de la formación de la fase gamma que es muy frágil y se produce con el calentamiento del material (18). Una ayuda gráfica muy utilizada por los soldadores de aceros inoxidables

austeníticos, es el diagrama de Schaeffler (figura 8.2), el cual tiene una amplia aplicación para determinar el porcentaje de ferrita en estas aleaciones. Para la construcción de este diagrama, todos los estabilizadores de la austenita fueron agrupados y sus efectos son expresados en términos de níquel equivalente (Ni_{eq}), es decir, la cantidad de austenizantes que serían necesarios para producir el mismo efecto del níquel. Lo mismo se hace para los elementos ferritizantes, los cuales son expresados en términos de cromo equivalente (Cr_{eq}).

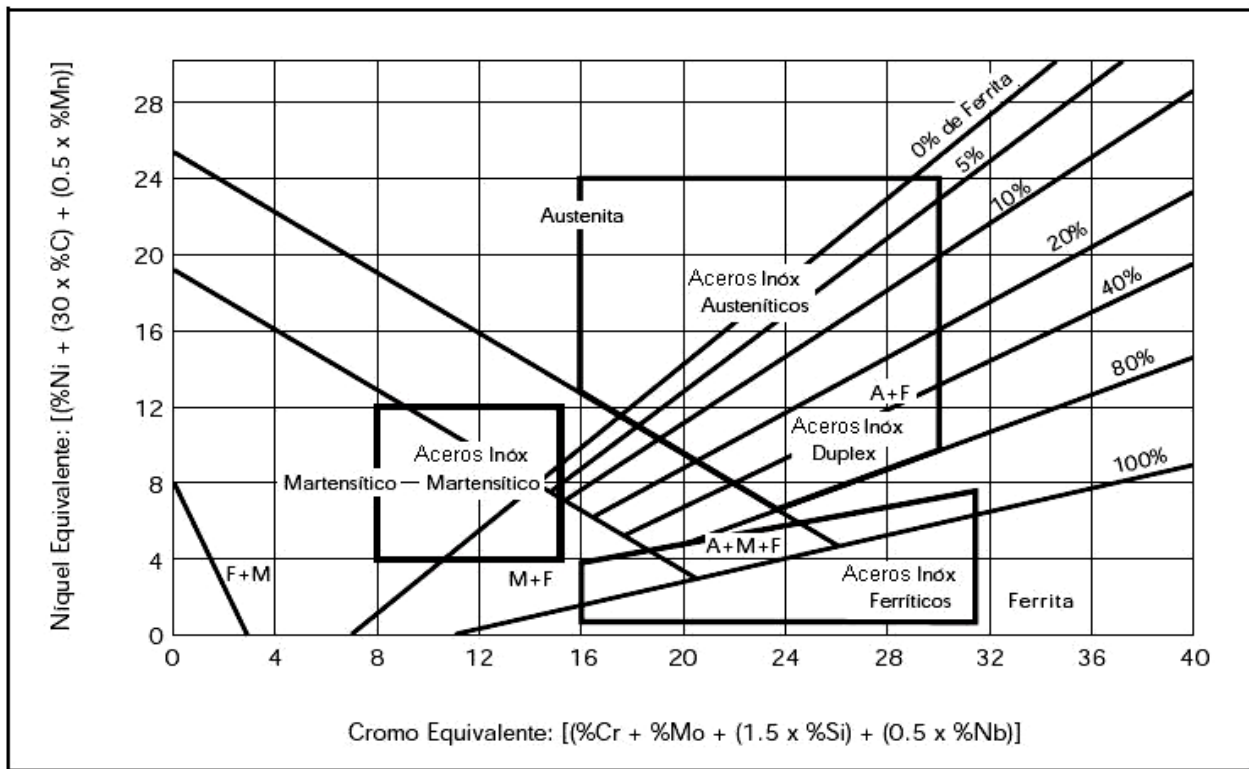


Figura 8.2. Diagrama de Schaeffler (8, 18)

Las expresiones matemáticas para el Cr_{eq} y Ni_{eq} son: (18)

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1,5 \%Si + 0,5 \%Nb \quad (8.3)$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30 \%C + 0,5 \%Mn \quad (8.4)$$

Además de la cantidad de ferrita, el diagrama de Schaeffler puede también ser utilizado para predecir el tipo de microestructura a encontrar en el cordón de soldadura, por ejemplo, supóngase que se va a soldar un acero tipo A202 que contiene 0,17 % C, 1,4 % Mn, 0,9 %

Si, 0,6 % Cr, con un electrodo tipo 308, con 18 % Cr, 8 % Ni, 0,08 % C, 1 % Si y 2 % Mn, además, la relación de dilución para electrodos de baja entrada de calor es de 80 % metal de aporte y 20 % del metal base, entonces tenemos: Reemplazando estos valores en las ecuaciones 8.3 y 8.4 para el Cr_{eq} y Ni_{eq} , se tiene: (18)

$$\begin{aligned} \text{Níquel equivalente: } & 0,8 \{8 + (30 * 0,08) + (0,5 * 2)\} + 0,2 \{(30 * 0,17) + (0,5 * 1,4)\} \\ & 0,8 \{11,4\} + 0,2 \{5,8\} = 10,28 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cromo equivalente: } & 0,8 \{18 + (1,5 * 1)\} + 0,2 \{0,6 + (1,5 * 0,9)\} \\ & 0,8 \{19,5\} + 0,2 \{1,95\} = 15,95 \end{aligned}$$

Tomando los valores de 10,28 para el Ni_{eq} y de 15,95 para el Cr_{eq} y ubicando el punto correspondiente sobre el diagrama de Schaeffler, se obtiene en el cordón de soldadura una estructura auténfica, martensítica y ferrítica, con un porcentaje ligeramente inferior al 5 % de ferrita (18).

8.4.1.4. Soldabilidad de aceros inoxidable endurecibles por precipitación

Los aceros inoxidable endurecibles por precipitación contienen elementos de aleación como el aluminio, niobio, tantalio y el cobre, que son los responsables del endurecimiento de la aleación por tratamiento térmico. Para asegurar la misma respuesta en el tratamiento térmico del metal de soldadura y del metal base, estos deben tener una composición química similar, además la pieza debe ser sometida a un calentamiento postsoldadura para homogeneizar las propiedades mecánicas (18).

8.4.1.5. Fragilidad por fase sigma y precipitación de carburos

Cuando un acero tiene una estructura austenítico - ferrítica y se calienta entre 550 °C y 900 °C, se produce un cambio de estructura y se forma una nueva fase llamada Sigma, después de los 550 °C se forma rápidamente esta fase, la cual tiene un efecto muy marcado de fragilización. La fase sigma parece ser el resultado de la difusión del cromo en la ferrita y

su composición es FeCr, pero también se forman compuestos similares como FeMo, FeSi, que favorecen la formación de la fase sigma. La fase sigma se genera al calentar el acero inoxidable a temperaturas superiores de 550 °C y por tiempos prolongados, aunque se ha encontrado evidencia que esta fase se puede generar en el cordón de soldadura. Si la fase sigma se forma en la soldadura, se debe calentar la pieza por encima de 900 °C, en donde esta fase se vuelve inestable y se redisuelve en la ferrita, entonces un poscalentamiento a 1000 °C, seguido de rápido enfriamiento, hará que la pieza recupera toda o parte de la ductilidad original del acero (18). Cuando los aceros inoxidables se calientan entre 425 °C y 875 °C, hay una tendencia del cromo y el carbono a formar carburos de cromo, el cual precipita en los límites de grano; estos carburos al tomar el cromo que hay disuelto en las áreas adyacentes a los límites de grano, empobrecen la matriz de cromo y la hace susceptible al ataque corrosivo (fenómeno denominado sensibilización del acero), en donde la región más crítica es la zona afectada térmicamente. El enfriamiento rápido desde 875 °C reduce o elimina la formación y precipitación del carburo de cromo, por lo anterior siempre está la posibilidad que en la zona afectada térmicamente se sensibilice el acero. Normalmente hay tres métodos para controlar la sensibilización del acero, estos son: (18)

- Recocido postsoldadura para redissolver los carburos y restaurar el cromo en la solución.
- Estabilizar el metal de soldadura y el metal base con elementos fuertemente carburizantes como Cb, Ti, Ta, para que formen carburos inertes y estables, dejando al cromo en solución.
- El uso de acero inoxidable con muy bajo contenido de carbono.

8.5. Soldabilidad de aceros al manganeso

El aumento de la dureza superficial de los aceros austeníticos al manganeso, al ser trabajados, se debe a la transformación de la austenita a martensita. Estos aceros inicialmente no son magnéticos ya que la austenita no es magnética, pero a medida que se van deformando por el trabajo, la austenita se transforma en martensita, la cual es

magnética, por tal motivo, si la pieza presenta un indicio de magnetismo, indicará la presencia de martensita en la superficie. El mecanismo completo del aumento de la dureza durante el trabajo, aún no ha sido establecido claramente, sin embargo, se deduce que la fragmentación del grano o la orientación cristalográfica son importantes (18).

Las piezas de acero austenítico al manganeso no deben ser calentadas por encima de 300 °C o enfriadas lentamente, debido a que puede provocar una transformación de la austenita en martensita, lo que llevaría a disminuir propiedades mecánicas como la ductilidad y la tenacidad, además de bajar drásticamente su soldabilidad, por tal motivo, al soldar este tipo de acero, hay que evitar todo precalentamiento y enfriamiento lento, en lo posible se debe sumergir parcialmente la pieza en agua para evitar el calentamiento excesivo de esta y mantener al mínimo la dilución entre el metal base y el metal de aporte, usando amperajes bajos o con electrodos de bajo amperaje (18). Cuando se va aplicar soldadura en piezas de acero austenítico al manganeso, hay que remover o eliminar las superficies endurecidas, la zona a soldar debe estar libre de óxidos, mugre y grasas, no precalentar la pieza, ya que contribuiría al calentamiento excesivo de la pieza durante el proceso de soldadura, el precalentamiento sólo se hará cuando la temperatura ambiente sea menor de 5 °C y este precalentamiento sólo será para sacarle el frío de la pieza. Cuando se aplique el electrodo se recomienda la técnica de cordón recto sin oscilaciones y con cordones alternados en la pieza para evitar deformaciones excesivas (18).

8.6. Soldabilidad de aceros herramienta

Los aceros herramienta se deben soldar en estado recocido, pero en muchos casos no se hace por el aumento de los costos. Las soldaduras de estas piezas se aplican en condición de bonificado (Temple y revenido), teniendo en cuenta que el precalentamiento y el poscalentamiento del metal base no pueden exceder la temperatura original de revenido (18). El precalentamiento es muy efectivo para eliminar o reducir el agrietamiento del metal base, ya que minimiza los esfuerzos de contracción. La temperatura de precalentamiento recomendada en función del tipo de acero para herramientas está en la tabla 8.1 (18).

Tabla 8.1. Temperatura de precalentamiento de algunos aceros herramienta

Tipo de aceros herramienta	Temperatura de precalentamiento
Aceros herramienta templados en agua	150 °C
Aceros herramienta templados en aceite	200 °C
Aceros herramienta templados al aire	300 °C
Aceros herramienta de alta velocidad	200 °C– 250 °C
Aceros herramienta para trabajo en caliente	350 °C

Los cuidados y precauciones que se deben tener al soldar estos aceros son:

- Usar técnicas, así sean manuales, para determinar el metal base.
- Seleccionar el electrodo más adecuado para minimizar el agrietamiento. Los electrodos fabricados por Eutectic–Castolin, tienen una menor entrada de calor que los demás electrodos del mercado Colombiano, por tal motivo serán los más convenientes (18, 35).
- Utilizar el electrodo de menor diámetro para realizar el trabajo.
- Realizar una buena preparación superficial retirando los óxidos, grasas y aceites por medio de maquinado, pulidora y desengrasantes.
- Taladrar las puntas de las grietas y rellenarlas para evitar nuevas grietas.
- Todas las grietas se deben biselar en U y nunca en V porque los ángulos agudos provocan grietas.
- Soldar el acero a la temperatura de precalentamiento recomendada.
- Monitorear y mantener la temperatura durante el proceso de soldadura.
- Mantener la entrada de calor al mínimo (bajo amperaje y voltaje) y reducir el amperaje para los pases secundarios y finales.
- Aplicar cordones cortos 1 pulgada máximo y aliviar esfuerzos martillando el cordón de soldadura después de aplicado.

El metal de aporte se debe seleccionar teniendo en cuenta los siguientes factores: (18)

- Cuando el metal base está recocido, la composición del metal de aporte deberá ser similar a la del metal base, para que responda de la misma forma a los tratamientos térmicos posteriores y obtenga la misma dureza.
- Cuando el metal base tiene tratamiento térmico de temple, es necesario tener en cuenta el área de la junta, de manera que el metal de aporte endurezca durante el enfriamiento, en estas condiciones el metal de aporte puede ser completamente diferente al metal base.
- Se puede utilizar en el primer o primeros pases, electrodos que formen un depósito que no endurezca durante el enfriamiento, como son los electrodos de acero inoxidable y los electrodos de bajo hidrógeno. En los pases finales se utiliza un electrodo que deje una composición de la misma dureza del metal base. Este proceso no se recomienda si la pieza va a ser templada y revenida después del proceso de soldadura.
- Cuando no se requiere de dureza, la práctica más común es realizar los cordones de soldadura con electrodos de acero inoxidable o de base níquel.

8.7. Soldabilidad de metales diferentes

Las soldaduras disímiles se producen cuando se unen dos materiales diferentes para mejorar el rendimiento de la construcción soldada. La soldadura por fusión de metales diferentes es factible a menos que se formen compuestos intermetálicos frágiles durante la solidificación para provocar un agrietamiento severo en el metal de soldadura o zona de fusión. Un ejemplo típico es el uso de aceros inoxidable ferríticos y austeníticos en aplicaciones de centrales eléctricas. Otros ejemplos son el uso de aceros inoxidable ferríticos y dúplex en aplicaciones que aprovechan las propiedades mecánicas y de corrosión mejoradas de los aceros inoxidable dúplex. También son conocidas la soldadura de Cu y acero al carbono, o acero inoxidable; y la soldadura de acero al carbono con aleaciones de Ni. El primer ejemplo es muy aplicado en los intercambiadores de calor, donde los tubos de Cu pueden mejorar el intercambio de calor debido a su excelente conductividad térmica. El segundo ejemplo está relacionado con las plantas de generación de energía, donde los aceros

inoxidables o las aleaciones a base de Ni pueden ofrecer una mejor resistencia a la corrosión. Sin embargo, debido a su complejidad, las soldaduras disimiles pueden ser susceptibles a fallas imprevistas. En este sentido, la fabricación de uniones libres de defectos es la principal preocupación en muchas aplicaciones de ingeniería, tales como recipientes a presión, petróleo, productos químicos, nuclear, aeroespacial, generación de energía y otras industrias. La soldabilidad, las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión de las soldaduras se controlan significativamente mediante el comportamiento de solidificación y la microestructura resultante de la zona de fusión. En la soldadura de metales diferentes, la macrosegregación (segregación de solutos a escala macroscópica a través del metal de soldadura), puede ocurrir debido a la diferencia de composición inherente entre los dos metales o aleaciones que se sueldan entre sí. La macro segregación ocurre no solo en la soldadura de metal diferente sino también en la soldadura de relleno de material diferente, es decir, la soldadura con un metal de relleno de diferente composición a la pieza de trabajo. Se ha reportado que las características de macro segregación causan problemas tales como pérdida de dureza, agrietamiento de hidrógeno, corrosión y agrietamiento por corrosión bajo tensión. Por lo tanto, es esencial entender cómo se forma macro segregación en las soldaduras. La macro segregación se debe a una zona no mezclada cerca del límite de fusión; en donde una capa estancada de metal base líquido se solidifica sin mezclarse con el charco de soldadura, debido a la viscosidad de los metales líquidos. Aunque los dos metales base fundidos se pueden mezclar en el charco de soldadura y formar un conjunto más homogéneo, esto no se logra y se crea una capa delgada de metal base fundido pero no mezclado a continuación del charco de soldadura, lo cual se puede deber a la diferencia de temperatura de fusión de los metales base (80, 81, 82).

8.8. Soldabilidad de hierros fundidos y aceros fundidos

Las fundiciones de hierro o simplemente fundiciones son aleaciones que contienen de 2,08 % al 6,67 % de carbono, pero la mayoría de fundiciones comerciales contienen entre 2,5 % y 4 % de carbono y de 1 % al 3 % de silicio. Las fundiciones para propósitos especiales

tienen más elementos de aleación. Además, las fundiciones tienen un rango de fusión menor que los aceros y presentan una alta fluidez al ser fundidos, tienen una contracción moderada durante la solidificación y enfriamiento. La tenacidad o resistencia al impacto y la ductilidad de la fundición de hierro son más bajas que el acero, lo que limita las aplicaciones de soldadura en este material. Las propiedades mecánicas de la fundición de hierro dependen de la microestructura y la distribución de los constituyentes microestructurales. El constituyente microestructural que tiene mayor efecto sobre las propiedades es el grafito, donde la cantidad, tamaño y la forma de las partículas de grafito afectan básicamente la resistencia y la ductilidad del material. La microestructura de la matriz que rodea las partículas de grafito también afecta las propiedades mecánicas, esta matriz es básicamente la misma que presenta un acero, es decir, ferrítica, perlítica, austenítica o martensítica; el tipo de matriz obtenida en la fundición depende de la composición química, velocidad de enfriamiento y tratamiento térmico. La velocidad de enfriamiento es afectada por el espesor de la sección y la transferencia de calor del molde. Las fundiciones son tratadas térmicamente para lograr propiedades que no se pueden obtener en las piezas coladas. El recocido, austenizado y temple son utilizados para lograr una nueva estructura en la matriz metálica con mejores propiedades (18).

Los tipos de hierro fundidos soldables son: fundición gris, maleable, nodulares y austenítico. Cuando el material se calienta, como en el caso de la realización de una soldadura, la matriz se puede enriquecer localmente de carbono y por el enfriamiento rápido, en la zona afectada térmicamente, pueden llegar a formarse fases duras y frágiles que pueden causar agrietamiento. Debido a estos factores metalúrgicos, los hierros fundidos son más difíciles de soldar que los aceros al carbono, además, las eficiencias (recuperación de las propiedades mecánicas de las piezas) en las juntas no alcanzan el 100 %. Por esta razón, algunos códigos como el *ASME Boiler and Pressure Vessel code*, no permite la soldadura de recipientes a presión que incluyan partes de hierro fundido. Sin embargo, la soldadura de los aceros fundidos es aceptable siempre y cuando sea un acero tipo ASME. Para obtener soldaduras exitosas en estos materiales se debe desarrollar un buen procedimiento, además de contar con soldadores calificados para desarrollar este tipo de

soldadura. La soldabilidad de los aceros fundidos es principalmente una función de la composición y el tratamiento térmico, por lo tanto, los procesos y las precauciones para soldar aceros forjados, también son aplicables a los aceros fundidos de composición, tratamiento térmico y resistencia similares. Todas las fundiciones de hierro, con excepción de la fundición blanca, se consideran soldables, pero en menor grado que los aceros al carbono (18).

Cuando se solda un acero colado de alta resistencia, en su condición tratado térmicamente, el último cordón debe ser depositado de manera que el baño producido por el arco no toque el metal base y la unión se produce por el metal depositado previamente; con esta técnica, la zona afectada térmicamente se reviene y el material mejora su tenacidad. Es importante controlar la cantidad de calor aportado a la soldadura, de tal manera que la penetración de la zona fundida sea la mínima para conseguir la fusión del metal base, ya que todo exceso de calor producirá un aumento del ancho de la zona afectada térmicamente y con esto aumentan las transformaciones estructurales que pueden conllevar a la fragilización de la junta soldada. Cuando se precalienta la pieza, los cordones de soldadura son más blandos y menos frágiles, pero la soldadura es más difícil de realizar. Durante la ejecución de la soldadura se debe mantener la pieza a la temperatura de precalentamiento y esta temperatura depende de la configuración, forma y tamaño de la pieza. Mientras mayores sean los espesores o la complejidad de las piezas a soldar, mayor cuidado hay que tenerse para evitar altas velocidades de enfriamiento que pueden conllevar al agrietamiento del cordón de soldadura o del metal base (18).

Los electrodos que se usan para soldar hierros fundidos generalmente producen soldaduras heterogéneas, es decir, la composición química del depósito de soldadura es diferente a la composición del metal base, y la aplicación de un determinado tipo de electrodo, ejerce una gran influencia sobre el resultado final. La selección de un electrodo para soldar hierro fundido puede ir desde el acero hasta el níquel, incluyendo aleaciones de monel (70 % Ni – 30 % Cu) y los aceros inoxidable (Cr-Ni). Los electrodos más comunes para soldar hierro fundido son los electrodos de núcleo metálico de aleación de níquel. La misma fundición

soldada en caliente, con el mismo electrodo, presenta una disminución en la proporción de cementita en la zona de unión y una notable mejoría en la apariencia de la soldadura. En la soldadura en frío de las fundiciones grises con electrodos de acero, la transformación en cementita, de la zona de unión, se acentúa y la parte fundida queda constituida casi totalmente por una estructura martensítica. La soldadura con electrodo de níquel o monel, da mejores resultados, obteniéndose una notable mejoría de la línea de unión, debido a la influencia grafitizante del níquel. La fundición blanca normalmente se considera insoldable, debido a que tiene baja ductilidad y no es capaz de absorber los esfuerzos térmicos que se generan en el metal base al soldarse. Las fundiciones maleables de corazón negro tampoco son soldables. Los cuidados y precauciones para soldar fundiciones en frío son: (18)

1. Usar técnicas apropiadas para determinar el metal base.
2. Seleccionar el electrodo más adecuado para minimizar el agrietamiento. Los electrodos fabricados por Eutectic–Castolin tienen una menor entrada de calor que los demás electrodos del mercado Colombiano, por tal motivo serán los más convenientes.
3. Utilizar electrodos de poco diámetro y con bajo amperaje, pero suficiente para producir una buena fusión.
4. Realizar una buena preparación superficial retirando los óxidos, grasas y aceites por medio de maquinado, pulidora y desengrasantes.
5. Taladrar las puntas de las grietas
6. Rellenar las grietas dejando de último las perforaciones de los extremos para evitar la aparición de nuevas grietas.
7. Todas las grietas se deben biselar en U y nunca en V porque los ángulos agudos provocan grietas.
8. Soldar sin corrientes de aire sobre la pieza
9. Mantener la entrada de calor al mínimo (bajo amperaje y voltaje).
10. Aplicar cordones cortos 1 in máximo y sin movimiento.
11. Aliviar esfuerzos martillando el cordón de soldadura con un martillo de bola después de aplicado el cordón de soldadura.

12. Monitorear y mantener la temperatura baja en el proceso de soldadura, tocando con la mano a 10 cm aproximadamente de la junta, si la mano no es capaz de soportar, hay que parar y dejar enfriar la pieza
13. Aplicar cordones alternados a la pieza para evitar el calentamiento de esta.
14. Limpiar la escoria entre pases para evitar la inclusión de escoria.
15. Realizar enfriamiento lento.

Los cuidados y precauciones para soldar fundiciones en caliente son: (18)

- Seguir los pasos anteriores del 1 al 7.
- Precalentar la fundición a la temperatura recomendada (300 °C – 400 °C).
- Monitorear y mantener la temperatura durante el proceso de soldadura.
- Soldar con cordones largos y sin martillar.
- Enfriar lentamente en horno o con cal, asbesto, ceniza entre otros.

Para aumentar la resistencia mecánica en piezas que están sometidas a grandes esfuerzos, se pueden colocar espárragos en las caras biseladas que son taladradas. Los espárragos no se recomiendan para espesores menores de 12 mm (1/2 in). Los espárragos muy unidos debilitan la pieza y muy separados no le dan la consistencia necesaria, por lo tanto, deben colocarse separados entre sí unas tres veces el diámetro del espárrago; la profundidad debe ser de 1,5 veces el diámetro y debe sobresalir entre el 50 % y el 80 % del diámetro. (18) Estos espárragos deben quedar bien fijos, de lo contrario debilitarían la pieza. Una vez colocados, se procede a soldar, aplicando un cordón alrededor de cada uno de ellos, antes de rellenar el bisel en sentido longitudinal. Cuando la reparación se hace sobre una sola cara, por ejemplo en el recargue de uno o varios dientes de un piñón, la separación de los espárragos debe ser de dos a tres veces el diámetro, la profundidad 1,5 veces el diámetro y la saliente debe ser la altura del diente o un poco menos. La forma más conveniente para recargar estos dientes es comenzar aplicando un cordón alrededor de cada espárrago, seguido del recargue de la parte de abajo con cordones alternados como se ve en la figura 8.3. (18)

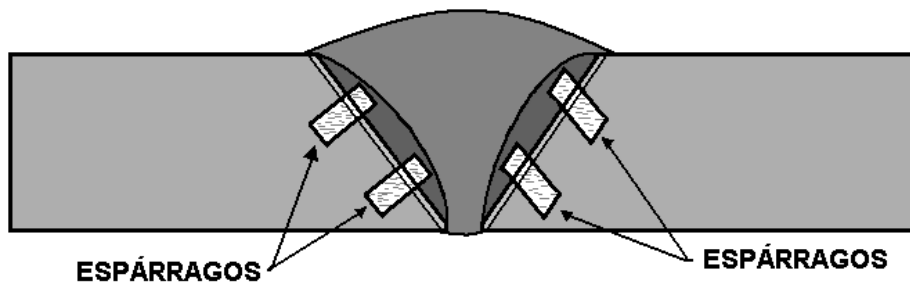


Figura 8.3. Soldadura en fundición con espárragos insertos

8.9. Soldabilidad de aleaciones de níquel

El níquel y sus aleaciones tienen una estructura cúbica centrada en las caras, con propiedades similares a la fase austenítica de las aleaciones de hierro, pero no presentan transformación de fase. Las aleaciones de níquel contienen cobre, cromo, hierro, molibdeno y cobalto, presentando altas resistencias a la corrosión, capaz de mantener sus propiedades a alta temperatura (18). Los elementos residuales como el plomo y el azufre son prácticamente insolubles en el níquel, además reaccionan y causan agrietamiento en caliente del metal de soldadura, por tal motivo deben ser eliminados o controlados por otros medios para asegurar la sanidad del cordón de soldadura y la zona afectada térmicamente. Las reacciones de los gases de protección pueden causar porosidad en el cordón de soldadura de las aleaciones de níquel que no contienen cromo, por tal motivo, en los metales de aporte se adicionan elementos como el titanio para prevenir la porosidad. Estas aleaciones pueden ser clasificadas como endurecibles por solución o endurecibles por precipitación, estas últimas requieren de un tratamiento térmico de envejecido para endurecer la aleación y para que desarrolle todas sus propiedades (18).

8.10. Soldabilidad de aleaciones de aluminio

El aluminio puro funde a 658 °C y las piezas de aluminio o aleaciones de aluminio desarrollan una capa superficial de alúmina Al_2O_3 , que es una película de óxido protector muy tenaz, cuyo punto de fusión es de 2100 °C, de ahí la dificultad en soldar este elemento, sin embargo, se han desarrollado procesos capaces de destruir esta capa sin fundir el metal

base. Las aleaciones de aluminio son versátiles y ampliamente usadas entre las aleaciones no ferrosas, debido a su bajo peso, buena resistencia a la corrosión y buena soldabilidad. Estas aleaciones se pueden clasificar en tratables térmicamente y no tratables térmicamente. Las propiedades mecánicas del aluminio y sus aleaciones no tratables térmicamente se consiguen por endurecimiento por deformación y por solución sólida. Las aleaciones tratables térmicamente se endurecen por envejecimiento, el cual es un tratamiento térmico isotérmico, a partir del cual se logra una precipitación de fases, que consiste en la formación de precipitados duros. Este tratamiento se realiza una vez la aleación se temple, para luego hacerse el recocido de envejecimiento (18).

Las piezas en aluminio que se van a soldar se deben precalentar por la alta conductividad térmica del aluminio. Como este material no cambia de color con la temperatura, entonces se debe aplicar un fundente en la zona de soldadura, para cuando este se licúe, indicará la temperatura precisa de aplicación. Otra forma de obtener una buena temperatura de precalentamiento es aplicando negro de humo (hollín), a la pieza cerca de la zona a soldar y cuando este hollín desaparezca, la pieza está lista para soldar. También hay que regular todos los parámetros del equipo de soldadura, de acuerdo con el diámetro del electrodo o del alambre y el espesor de la pieza (18).

La limpieza previa del aluminio en la junta, es esencial para obtener una calidad óptima en el cordón de soldadura y esta se vuelve crítica cuando se realiza el procedimiento TIG con corriente continua y polaridad directa, porque el arco, bajo estas condiciones de suciedad, no ejerce una acción limpiadora y destructora de la capa de óxido que se forma sobre la aleación de aluminio. Además se prefiere que la limpieza, antes de soldar, se lleve a cabo con cepillo de acero inoxidable, ya que los cepillos de acero al carbono pueden oxidarse en presencia de humedad y dejar en la junta óxidos de hierro que pueden formar inclusiones en el metal de soldadura (18). Cuando se suelda con el proceso oxiacetilénico, preferiblemente con llama carburante, se debe precalentar a 300 °C y utilizar un fundente que disuelva la capa de óxido; el enfriamiento debe ser lento y quitar el fundente del cordón de soldadura con agua tibia, ya que este puede ser corrosivo. Con el proceso por arco con electrodo

recubierto, se debe precalentar entre 100 °C y 200 °C, hacer cordones continuos, usando corriente continua con polaridad invertida o con corriente alterna, el enfriamiento debe ser lento y se debe quitar la escoria entre pases con cepillo de acero y después del último pase, retirar todos los rastros de fundente ya que puede ser muy corrosivo (18). En el proceso de soldadura TIG, la alta frecuencia del arco de corriente alterna elimina la capa de óxido (alúmina), y la atmósfera protectora con gas de argón impide la nueva oxidación, el metal de aporte en este proceso, se aplica sin fundente y en espesores delgados no es necesario precalentar o usar material de aporte. La soldadura es excelente, pero se encarece para espesores gruesos y en estos casos se prefiere el proceso MIG. El aluminio y sus aleaciones necesitan metales de aporte compatibles con el metal base (18).

8.11. Soldabilidad de aleaciones de cobre

El cobre puro tiene buena soldabilidad pero hay que precalentarlo a 250 °C aproximadamente. Por su alta conductividad térmica, los cordones de soldadura deben ser rectos y angostos, de poco espesor y martillar entre cordones. En los latones la soldabilidad es regular y se prefiere soldar con los procesos oxiacetilénicos y TIG; la utilización del arco con electrodo recubierto está condicionada a latones con bajo zinc para evitar la evaporación del zinc, que ocurre a los 903 °C, debido a que los latones con alto contenido de zinc pierde este elemento, que es volátil a la temperatura de soldadura, perdiéndose en forma de humos densos, por lo que se presenta un cambio de composición en estos materiales: El precalentamiento en los latones depende del proceso de soldadura y del espesor de la pieza a soldar. El bronce al silicio sólo debe ser precalentado a 50 °C, debido a que a mayores temperaturas aumenta la tendencia a las trizaduras, los cojinetes de cobre al oxígeno también son difíciles de soldar, debido a la pérdida de resistencia y la presencia de porosidad. Las aleaciones de cobre son básicamente monofásicas y la mayoría no presentan cambios cristalográficos en el calentamiento y el enfriamiento, pero son tratables térmicamente. La inhalación de humos de cobre, en cantidades que exceden 0,1 mg/m³, produce un estado grave con escalofríos, fiebre y náuseas, que comienzan poco después de la exposición a los humos y dura unas 24 horas (18).

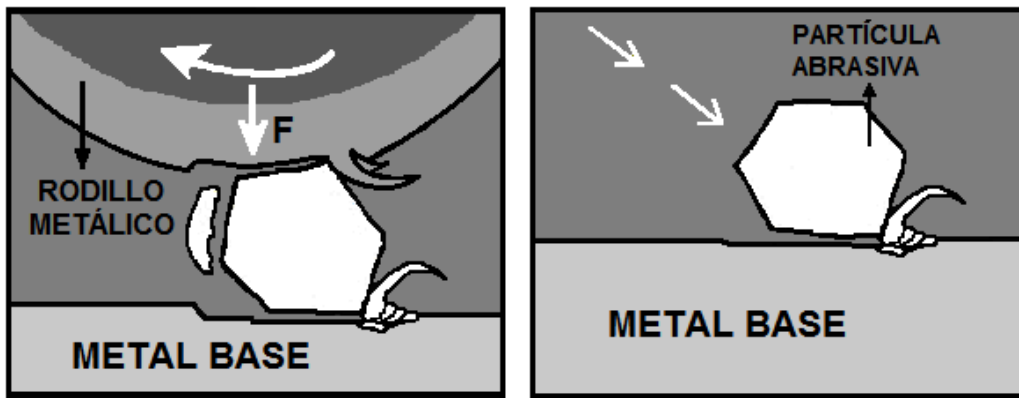
8.12. Factores que promueven el deterioro de estructuras y piezas mecánicas

La interrelación entre el desgaste, la fricción, la erosión y la falta de lubricación conlleva al deterioro de partes y piezas de equipos industriales, lo que implica soluciones efectivas para prevenir y controlar estos fenómenos. Son muchos los factores que pueden afectar una pieza o estructura metálica, causando daños o deformaciones en estas; las cuales van en detrimento de las propiedades del material, para la utilización en un fin determinado y la economía de las industrias. El desgaste es uno de los principales responsables por la mayor parte de deterioro y salida de servicio de piezas mecánicas, mientras la corrosión es la responsable por el deterioro de estructuras metálicas. Por otro lado, la fatiga sólo causa daño cuando la pieza o elemento mecánico sobrepasa el valor de los esfuerzos cíclicos admisibles. Las grandes pérdidas económicas generadas por deterioro de los materiales y el alto costo para su reposición, demandan el desarrollo de tecnologías para la reconstrucción y preservación de éstos recursos no renovables. La avanzada tecnología de los recubrimientos, provee a las industrias, uno de los medios más eficaces para combatir el desgaste prematuro, adelantándose a la falla o al momento en que el equipo deja de trabajar en sus condiciones óptimas. De esta forma se optimiza la disponibilidad de la maquinaria, se disminuye costos de mantenimiento y se maximiza la vida útil (83).

8.12.1. Solución a problemas de desgaste a través de recubrimientos protectores

El desgaste es la pérdida progresiva de material en la superficie de trabajo de una pieza o cuerpo. Ahora, para hacer una buena selección del tipo de revestimiento protector y del tipo de electrodo que se necesita, buscando de recuperar la superficie desgastada, hay que conocer los tipos de desgaste a los que puede estar sometido la pieza que se quiere proteger, ya que un recubrimiento puede tener una alta resistencia a un determinado tipo de desgaste bajo ciertas condiciones, pero al cambiar la forma del desgaste debido al cambio de las condiciones originales, el recubrimiento puede no responder de buena forma y no funciona. Por lo anterior se hace un resumen de algunos los tipos de desgaste más conocidos como:

Abrasión: Es el desgaste causado por el movimiento de partículas sobre una superficie, pudiéndose dividir en 1) abrasión de bajo esfuerzo, ocasionado por pequeñas cargas y sin fracturar el material abrasivo, 2) abrasión de alto esfuerzo, ocasionado por grandes cargas y generalmente el material abrasivo atrapado entre las dos superficies se fractura y 3) abrasión por desgarramiento, donde el material abrasivo es grande y el desgaste está combinado con impacto. Un esquema de desgaste abrasivo es mostrado en la figura 8.4.a y otro de desgaste erosivo en 8.4.b (18).



a) Desgaste abrasivo

b) Desgaste erosivo

Figura 8.4. Esquema de dos tipos de desgaste (8, 18, 33)

Desgaste por deslizamiento: Es el desgaste originado por el deslizamiento entre dos superficies metálicas sin la presencia de material abrasivo y con o sin lubricación (18).

Erosión: Es el desgaste originado por la acción de partículas que son transportadas por un fluido y que impactan la superficie de la pieza. La pérdida del material está relacionada con el ángulo de incidencia, el tipo de material impactante, el tamaño, la velocidad y la forma de las partículas. Estas variables influyen en la selección del tipo de revestimiento, ya que para ángulos pequeños, se requiere de alta dureza de este y para ángulos grandes lo que se necesita es de gran tenacidad. Un esquema de este tipo de desgaste es mostrado en la figura 8.5.b. (18).

Cavitación: Es el desgaste originado por la implosión de burbujas producidas en una zona de baja presión, en un sistema que maneja fluidos, donde la energía liberada durante la implosión de estas burbujas causan picaduras en el metal. Un esquema de este tipo de desgaste es mostrado en la figura 8.5. (18).

Impacto: Es el desgaste originado por un cuerpo que tiene una velocidad y choca contra otro. Para que un material pueda soportar impactos debe tener una alta tenacidad (18).

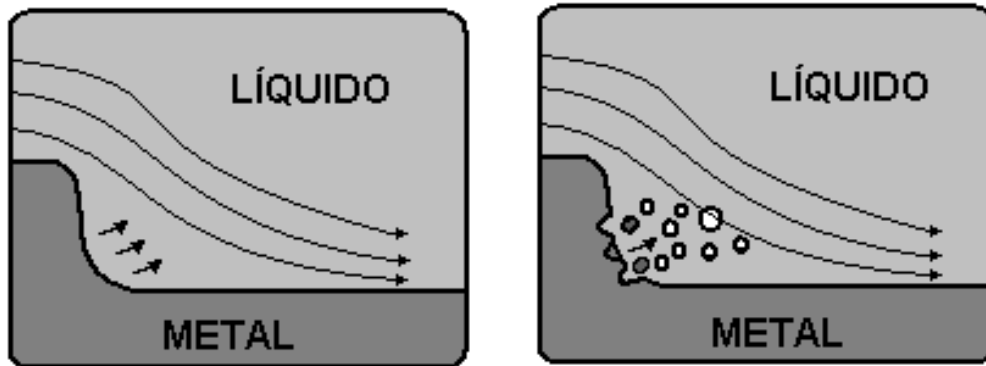


Figura 8.5. Esquema del desgaste por cavitación (18)

Corrosión: Es el desgaste originado por una reacción química o electroquímica entre un metal o aleación y su medio ambiente, en donde los átomos metálicos superficiales pasan a compuestos químicos o minerales (18).

Los tipos de desgaste anteriores pueden aparecer solos o combinados y se deberá seleccionar el electrodo que deposite el revestimiento protector que resista de la mejor manera a los diferentes tipos de desgaste. Para seleccionar el revestimiento más adecuado se debe identificar el tipo de desgaste y el metal base, donde el metal base se puede identificar, grosso modo, teniendo en cuenta el trabajo que desempeña la pieza, su forma y volumen, apariencia del grano en la rotura, forma de la rotura, etc. La aplicación de recubrimientos duros en superficies deterioradas consiste en depositar alguna clase de aleación especial sobre una parte metálica, por alguno de los diversos métodos, para formar una superficie que resista los fenómenos de desgaste anteriores o alguna combinación de ellos. Para una buena aplicación del revestimiento protector, hay que tener en cuenta la preparación superficial y para esto hay que limpiar la zona de soldadura de suciedad, grasas, aceites, óxidos y contaminantes, remover el material corroído, deformado o fatigado, se deben reparar la grietas con aleaciones compatibles con el metal base y en lo posible tratar de soldar en posición plana. La selección de una aleación para recubrimiento

duro en una superficie metálica, se basa en los ahorros y ventajas que se obtienen por la aplicación de la aleación. Tales ahorros y ventajas provienen del aumento de la producción, el uso de un menor inventario de piezas de repuesto y la reducción de tiempos muertos. Prácticamente, en todas las aplicaciones de recubrimientos duros en superficies, los materiales de recubrimiento representan el elemento menos importante en el costo total, ya que los salarios, la producción perdida durante los tiempos muertos y las tasas de sobre costo administrativo son mucho más importantes (18). La selección del proceso de soldadura más adecuado puede ser tan importante como la selección de la aleación de recubrimiento duro. Al escoger dicho proceso, junto a los requerimientos de servicio, deben considerarse las características físicas de la pieza de trabajo, las propiedades metalúrgicas del metal base, la forma y la composición de la aleación para el recubrimiento, los requisitos, en cuanto a las propiedades y calidad del depósito de soldadura, la habilidad del soldador y el costo de la operación. Se deben coordinar por lo menos tres de los siguientes factores en la aplicación de un recubrimiento; el metal base, la composición y la forma de la pieza, la aleación del recubrimiento y el proceso de soldadura. En la figura 8.6 se observa un balde y la protección de una uña del balde de una retro excavadora (18).

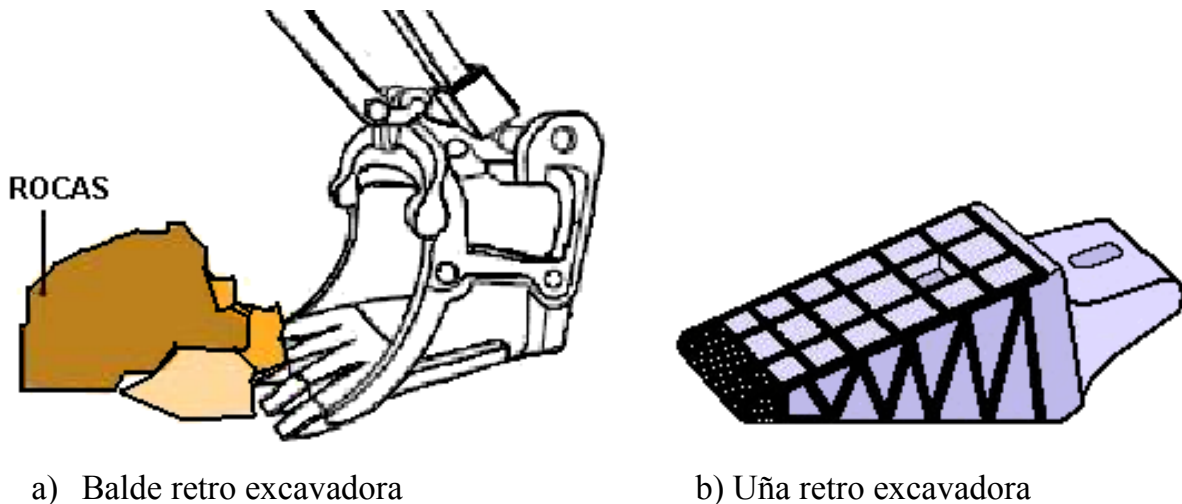


Figura 8.6. Protección del metal contra la abrasión (8, 18)

En ocasiones el precalentamiento es necesario para disminuir la distorsión, evitar el choque térmico y prevenir la formación de grietas, el precalentamiento se debe realizar a la

temperatura recomendada para el espesor, la forma y el metal base de la pieza que se va a soldar. Hay que tener cuidado con los aceros Hadfield o aceros al manganeso, ya que estos aceros no se deben calentar por encima de 300 °C por periodos prolongados (18). Cuando las piezas están muy desgastadas, es necesario restaurarlas cerca de su forma y medida originales antes de aplicar el revestimiento protector, para esto se usan aleaciones compatibles con el metal base y el revestimiento protector, que tengan buena resistencia al tipo de desgaste sufrido por la pieza, que tengan una buena tenacidad y en ciertas ocasiones se usa metal de aporte similar al metal base, pero casi siempre no es la mejor opción, sólo cuando la pérdida de metal base es muy grande y se utilizan postizos. En el proceso por arco eléctrico se recomienda realizar dos pases de revestimiento protector para obtener la mejor condición de servicio, debido a que en el primer pase se produce cierta dilución o mezcla con el metal base y no se puede garantizar las propiedades del revestimiento, ya en el segundo pase se obtienen todas las propiedades de resistencia al desgaste del revestimiento, por otro lado, un tercer pase podría arrancar los pases de revestimiento o fisurarlo, por tal motivo no se recomienda un tercer pase con revestimiento protector. Además, la selección de la forma del cordón de soldadura está relacionada con las condiciones de servicio, ya que la forma del cordón de soldadura puede influir en el tiempo de servicio del recubrimiento. Las formas de los cordones de soldadura más conocidos son el paso corto, cordón largo, puntos, diamante o rombo y espina de pescado. En la figura 8.7 se observan diferentes tipos de cordones de soldadura (18, 33).

El control de la distorsión y el alabeo son muy importantes a la hora de reconstruir una pieza, y para esto hay que seleccionar el diámetro de electrodo con su respectivo amperaje en función del tamaño de la pieza. En lo posible mantener el metal frío, con cordones alternados y espaciados, trabajar en varias piezas al mismo tiempo, para poder aplicar pequeños cordones en cada pieza y por último contemplar la posibilidad de sumergir parcialmente la pieza en agua para que absorba calor durante el proceso de soldadura. Las ventajas de las soldaduras de mantenimiento son el aumento de la vida útil de la pieza, reduciendo los costos de mantenimiento y pérdidas por el tiempo en que los equipos están fuera de servicio, se reducen los costos de inventarios y repuestos, ya que la posibilidad de

recuperar las piezas desgastadas elimina la necesidad de grandes inventarios de repuestos. Permite la reparación de piezas desgastadas, obteniendo una vida útil en servicio más larga que una pieza nueva y se reduce el consumo de energía, por la mayor eficiencia en servicio de las piezas recuperadas (18, 33).

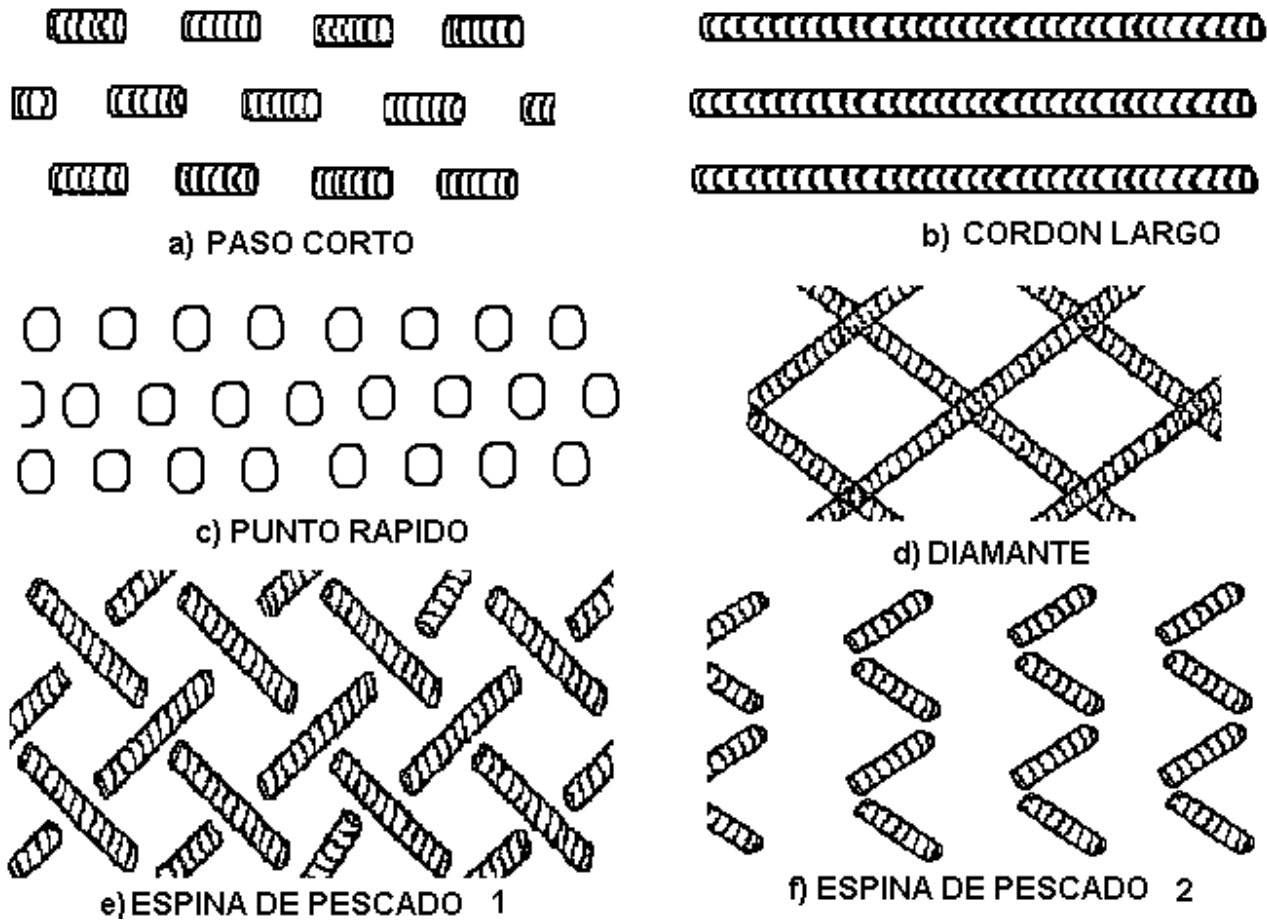


Figura 8.7. Algunos tipos de cordones de soldadura (18, 32)

8.12.2. Recubrimientos duros y láminas anti desgaste contra el desgaste abrasivo

Los aceros sin recubrimiento presentan una menor dureza y mayor pérdida de volumen frente al desgaste abrasivo que los aceros que están protegidos con recubrimiento duros, además, la resistencia al desgaste aumenta a medida que aumenta la dureza, pero no es un patrón de crecimiento lineal. Por lo tanto, la información sobre la dureza puede proporcionar un criterio de selección, pero no es el único factor determinante al elegir una

soldadura para la protección contra el desgaste por abrasión. Los revestimientos que tienen cromo presentan una mejor resistencia al desgaste, ya que formaron carburos de cromo que son más resistentes que los carburos de hierro. Además, cuanto más complejo sea el carburo de cromo y cuanto mejor sea la distribución morfológica de estos carburos, mejor será el comportamiento frente al desgaste por abrasión. La precipitación de carburos en el acero depende de la cantidad de cromo y carbono; cuando la relación es inferior a 3: 1, el carburo formado es aleado con cementita, pero si la proporción es superior a 3: 1, los carburos de cromo que se forman son de tipo Cr_7C_3 y Cr_{23}C_6 . Por lo tanto, una prueba de dureza no puede evaluar completamente el comportamiento contra el desgaste por abrasión, ya que la relación entre la microestructura y el desgaste es muy compleja y no se comprende completamente. La placa anti desgaste fabricada con recubrimientos tiene una dureza menor o similar a los recubrimientos duros aplicados de alto rendimiento aplicados por soldadura, pero su resistencia al desgaste abrasivo es mayor porque tienen carburos de niobio, cromo, molibdeno y cobalto, que son más resistentes a este desgaste (84). Los revestimientos duros de alto desempeño aumentan en gran medida la dureza y disminuyen la pérdida de volumen, mejorando la resistencia al desgaste abrasivo en más del 300 % con respecto al acero sin recubrir. En general, las placas anti desgaste fabricadas con soldadura con compuestos nano estructurados tienen un excelente rendimiento frente al desgaste abrasivo mejorando su rendimiento en más del 930 % en comparación con un 1045 acero sin recubrimiento, y más del 340 % en comparación con los mejores revestimientos duros aplicados por soldadura. Las placas anti desgaste endurecidas mediante el tratamiento térmico de temple (abrazo 400 y CR 400) tienen un mejor rendimiento que casi todos los recubrimientos duros, con la excepción de los revestimientos de alto desempeño que tienen un mejor rendimiento que las láminas tratadas térmicamente (84).

8.13. Recuperación por soldadura de un molino vertical ATOX

El molino vertical ATOX de 32.5 toneladas se utiliza para molienda de caliza, con un juego de 6 placas borde de mesa, en forma perimetral a la mesa, en la parte baja de la puerta de entrada, además se utilizan rodillos para la molienda, los cuales se habían reconstruido con

carburos de cromo. Las paradas del horno para mantenimiento son cada 5 o 6 meses, según la vida útil de los rodillos y la mesa. Las primeras aplicaciones de soldadura, se hicieron con carburos de cromo, sin recubrir zona de tornillos, solo se recubrieron las placas más críticas. Debido al desgaste progresivo y severo, el cual se concentra principalmente en las partes intermedias, se protegió la placa de borde por medio de soldadura con uno de los recubrimientos duros que contienen carburos complejos y placas con revestimiento de soldadura. Con la aplicación del recubrimiento duro por soldadura se pasó de dos meses de trabajo a cinco meses, por tal motivo se decide aplicar en los sitios donde ocurrieron las perforaciones causadas por el desgaste, con soldadura con carburos especiales, los cuales tienen una mayor dureza, debido a que no se descomponen tan fácil durante el proceso de soldadura. En la siguiente parada, se observó que el recubrimiento por soldadura con carburos especiales quedó intacto y el desgaste se acentuó en otro lado, esto mismo pasó con las otras placas donde se había aplicado el revestimiento. Según los resultados anteriores, se procedió a realizar un ensayo piloto, en la placa de mesa crítica, debido al gran desgaste abrasivo, para tal fin se seleccionó recubrimientos duros con carburos complejos y láminas anti desgaste, las cuales están formadas por láminas A36 recubiertas por soldaduras automatizadas con recubrimientos duros que contienen carburos complejos especiales, las cuales están listas para ser montadas. La placa de mesa, después de haber molido 55000 toneladas, durante un periodo de trabajo de seis meses, no muestra un gran desgaste o desgaste severo en la zona intermedia que es la zona más crítica, además el desgaste en la parte inferior en la zona de la lámina A36 es pequeña, por tal motivo la placa sale para reparación y vuelve para ser utilizada nuevamente, algo que ocurre por primera vez. Después de reparar la placa, esta entra en servicio y se mantiene por un periodo de diez meses, ya que este fue el tiempo que se demoraron en hacer la parada, por tal motivo se hace un nuevo reaprovechamiento de la placa de mesa revestida o protegida y trabaja nuevamente otros seis meses hasta una pequeña parada para realizar cambios de rodillos y mesa. El desgaste marcó la ruta a seguir para poderlo combatir por medio de recubrimientos protectores aplicados por soldadura, aumentando el tiempo de servicio de las partes protegidas, además se ensayaron diferentes combinaciones de soldadura para tener varias alternativas de protección (83).

8.14. Soldaduras y revestimientos poliméricos

Existen limitaciones en la utilización de soldaduras y revestimientos poliméricos, marcados por la presión, temperatura y la composición del medio en donde se va a realizar la soldadura o donde se va a recuperar la pieza. Ningún revestimiento, por más sofisticado que sea, puede operar bien si está mal aplicado, en efecto, la experiencia dice que el 90 % de las fallas se debe a la mala preparación de la superficie, mientras que el 10 % restante se debe a una mala selección del revestimiento que es sometido a medios para el cual no fue diseñado. En la figura 8.8 se observa una reparación con revestimiento polimérico (18, 33).



a) Pieza antes de reparar

b) Pieza después de reparar

Figura 8.8. Reparación con revestimiento polimérico (18, 33)

La adhesión al sustrato es la propiedad más importante de un revestimiento, ya que, sin una buena adhesión no pueden existir adecuadamente las otras propiedades como resistencia al impacto, abrasión y corrosión entre otras. Además, el estado de la superficie, en el momento de aplicación tendrá influencia en el comportamiento del revestimiento en servicio. La fuerza de adhesión de una soldadura polimérica al sustrato depende de tres factores fundamentales como el tipo de unión entre átomos de las cadenas poliméricas y los átomos de sustrato metálico; el mojado del polímero al metal, que acerca los átomos de las cadenas poliméricas a los átomos del metal, para formar esa unión con la mayor densidad

posible; y la textura de la superficie del metal, que da el perfil de anclaje y que aumenta la superficie real y produce áreas de anclaje mediante cavernas cóncavas (18, 33).

La fuerza de unión polímero-metal, está determinada por el tipo de unión que se forma entre los átomos de las cadenas poliméricas y los del sustrato metálico, estas uniones pueden ser: (18, 33)

- Químicas: Que son las más fuertes, pero necesitan de grupos funcionales tanto en la molécula polimérica, como en el sustrato metálico.
- Polares: Que unen la soldadura al sustrato metálico con una fuerza media.
- Polares inducidas: También llamadas de Van Der Waals, que son las más débiles y son las fuerzas intermoleculares en los termoplásticos.

Para que exista un buen mojado o mojado completo, es necesario que la tensión superficial de la interface soldadura / metal, más la interface polímero/ aire, sea menor a la del sustrato/ aire (18, 33). El anclaje del revestimiento se refiere a la textura de la superficie, esta textura genera una superficie real mucho mayor a la aparente. La reparación de la superficie que se realiza por granallado o arenado (*sandblasting*), produce ese perfil de anclaje con picos y valles y se ha determinado que este sea mayor a 35 μm medidos entre esos picos y valles. El granallado o arenado no limpian la superficie. Si una superficie está contaminada con grasas o con sales, no la removerá si no que quedará incorporada de alguna manera y afectarán la mojabilidad y la posibilidad de hacer efectivas las uniones entre átomos del polímero y del sustrato, que confiere su inherente fuerza de adhesión. El granallado o arenado, a su vez, no deben introducir sustancias contaminantes como sales solubles o restos incorporados de su uso anterior, durante su reciclado. Ambas, granalla y arenas deben cumplir con especificaciones particulares que tienen en cuenta esos aspectos.

La clasificación inicial aceptada de soldadura o revestimiento polimérico es la de polímeros termoestables y polímeros termoplásticos. Los polímeros termoestables son aquellos en los que las reacciones químicas se desarrollan al aplicarlo, los convierte en una capa irreversiblemente sólida, debido al fuerte entrecruzamiento entre cadenas poliméricas. Esto

ocurre por reacción química entre las moléculas, en ciertos puntos específicos, distribuidos con cierta densidad y logran trabar el movimiento relativo entre estas cadenas, rigidizando la estructura. Este proceso es llamado curado. Los polímeros termoplásticos son aquellos en los que su estado sólido, aún después de aplicarlo, es delimitado por la temperatura. En los polímeros termoplásticos el estado sólido está determinado, no por la rigidización debida al entrecruzamiento por reacción química entre las moléculas, sino por uniones de tipo Van Der Waals o polares inducidos, entre cadenas adyacentes. Estas uniones, si bien débiles, están distribuidas a lo largo de toda la molécula con alta densidad y son suficientes como para formar un sólido debajo de ciertas temperaturas críticas, por acumulación muy contigua de moléculas poliméricas. Por encima de estas temperaturas fluye como líquido. En general, los termoplásticos pueden no ser totalmente amorfos y como por ejemplo, el polietileno que guarda cierto porcentaje en volumen de fase cristalina que contribuye con su solidez y otras propiedades (18).

8.14.1. Aplicación de la soldadura o revestimiento polimérico

La mayor parte de estos revestimientos poliméricos pueden curarse a la temperatura ambiente y pueden requerir desde unas cuantas horas hasta 48 horas. La aplicación del revestimiento puede ser en estado líquido o pastoso. La mezcla de la base polimérica con el agente curador (mal llamado catalizador), que comenzará la polimerización y el curado se realiza en muy poco tiempo antes de la aplicación. En general estos revestimientos son de muy alto contenido de sólidos en volumen, donde por sólidos en volumen, se refiere al porcentaje de sólidos que quedará en el revestimiento cuando este quede seco y curado. En la figura 8.9 se observa una aplicación de un revestimiento epóxido contra la abrasión (18).



Figura 8.9. Aplicación de un revestimiento epóxido contra la abrasión (18, 33)

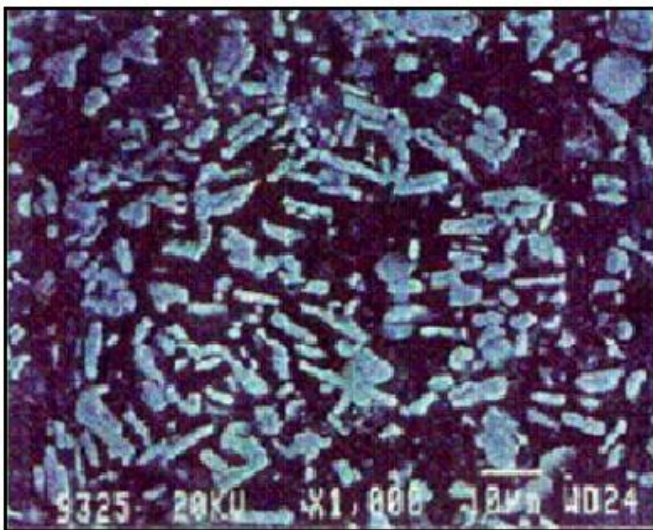
El curado es una reacción química por la cual se realiza el entrecruzamiento de las moléculas poliméricas, con lo que pasa de un fluido pastoso a un sólido rígido. La rigidez del sólido depende de cuan denso sea ese entrecruzamiento entre cadenas poliméricas. A mayor densidad de entrecruzamiento, mayor rigidez, dureza y resistencia química. Se debe considerar también, que a mayor dureza y rigidez hay mayor fragilidad y menor tenacidad. La mayoría de estas formulaciones tienen predeterminadas una duración útil de media hora a dos horas, después de este tiempo, se vuelven demasiado rígidas para hacer su aplicación. El activador que presenta la fuerza para entrelazar en forma cruzada los polímeros de la resina, debe agregarse en la cantidad prescrita, para que ocurran todas las reacciones posibles y no debe quedar en la mezcla ningún exceso de activador (agente curador). Por la misma razón, debe mezclarse adecuadamente el material, para asegurarse de que tengan lugar todas las reacciones (18).

8.14.2. Revestimientos polímero-cerámico

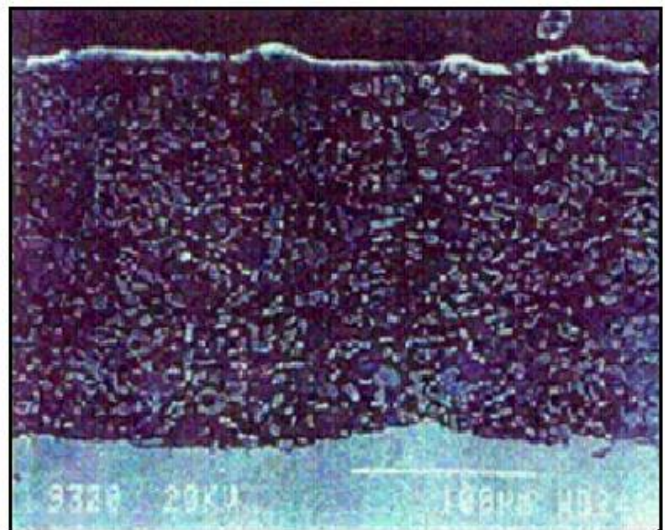
Existen revestimientos que por su diseño químico polimérico, se pueden utilizar en servicio con un estado de curado no del todo completo, dejando un entrecruzamiento no tan denso, lo que permite mayor ductilidad y tenacidad. Cuando la temperatura de servicio es mayor a la del curado, el curado continúa hasta adecuarse a esa temperatura, pero manteniendo un máximo posible de ductilidad.

La dureza, la resistencia al impacto, a la abrasión y también a la corrosión, vienen dadas por la densificación de la masa polimérica, usando un cierto contenido de partículas cerámicas muy duras (carburos de tungsteno), embebidos en la fase polimérica. Cada partícula debe estar embebida en el polímero, sin segregación y adherida al polímero, como se muestra en la figura 8.10, donde se muestran partículas cerámicas de un revestimiento Epoxy-Cerámico. Estas partículas muy duras e inertes, que generan resistencia al impacto y a la abrasión, obligando a un camino senoidal que deben seguir las especies abrasivas y corrosivas que penetran en el epóxido. Los efectos de las partículas cerámicas sobre las propiedades del conjunto son: (18)

- Aumentar la resistencia a la abrasión y al impacto en sinergia con la ductilidad de la fase continua polimérica.
- Mejoran la resistencia a la corrosión.
- Aumentan la adhesión al sustrato.
- Aumentan la conductividad térmica del revestimiento.



a) 10 μm



b) 100 μm

Figura 8.10. Revestimiento Epóxico-Cerámico (18)

9. DISCONTINUIDADES Y DEFECTOS EN LA SOLDADURA

En soldadura los tipos de discontinuidades que se presentan son penetración incompleta, fisuras, poros, falta de fusión, socavación, desalineación y solape, entre otras; más aún, pueden aparecer grietas durante la solidificación y después de 48 horas de haber depositado el cordón de soldadura, lo cual es problemático ya que actúan como sitios de concentración de esfuerzos conllevando a una falla prematura. El conocimiento de estas discontinuidades es importante (naturaleza, ubicación y tamaño), ya que con esta información se determina si esa discontinuidad requiere o no reparación, de acuerdo con las especificaciones del trabajo. Los defectos que pueden presentar las soldaduras son variados y complejos, por tal motivo, sólo se mencionarán aquellos que por sus consecuencias son realmente importantes. Los defectos en la soldadura se pueden clasificar como defectos metalúrgicos y como defectos físicos. La severidad y la importancia de los defectos de soldadura dependen del tipo y la cantidad de estos, y sin lugar a dudas, están relacionados con el tipo de soldadura, el proceso de soldadura realizado y los requerimientos de la junta en servicio. Una discontinuidad puede ser perjudicial en algunos casos y en otros no, por tal motivo, es un trabajo difícil determinar la importancia relativa, debido a que el tamaño y el tipo de discontinuidad en la soldadura necesitan ser analizado en función de la soldadura y su requerimiento en servicio. Los defectos en la soldadura se pueden clasificar en defectos dimensionales, discontinuidades estructurales en la soldadura y defectos en las propiedades del metal y la junta (85).

Es muy importante comprender la diferencia entre discontinuidad y defecto, debido a que la gente erróneamente intercambia ambos términos. Mientras que una discontinuidad es una irregularidad en una estructura que de otra manera sería uniforme, un defecto es una discontinuidad específica que puede comprometer el comportamiento de la estructura para el propósito que fue diseñada. Un defecto es una discontinuidad definida, con un tamaño suficiente como para que la estructura o el objeto particular sea inapropiado para el uso o

servicio para el que fue diseñado, basándose en el criterio del código aplicable. Para determinar si una discontinuidad es un defecto, debe haber alguna especificación que defina los límites aceptables de la discontinuidad. Cuando su tamaño o concentración excedan esos límites, es considerado un defecto. Por esto podemos pensar que un defecto es una “discontinuidad rechazable”. Por eso, si nos referimos a algún aspecto como un defecto, implica que es rechazable y requiere alguna clase de tratamiento posterior para llevarlo a los límites de aceptación de algún código. Para una mejor introducción al tema “Defectos en las soldaduras” es necesario comenzar definiendo términos tales como indicación, discontinuidad, defecto, evaluación de indicaciones, entre otras (3).

Indicación: Respuesta o evidencia de una discontinuidad resultante de la aplicación de un ensayo no destructivo (END) (3).

Discontinuidad: Falta de continuidad; falta de cohesión (de unión); interrupción en la estructura física normal del material o producto (3).

Defecto: Discontinuidad cuyo tamaño, forma, orientación, ubicación o propiedades son inadmisibles de acuerdo a alguna norma específica. En particular, al realizar un ensayo no destructivo (END) se cataloga como defecto a toda discontinuidad o grupo de discontinuidades cuyas indicaciones no se encuentran dentro de los criterios de aceptación especificados por la norma aplicable (3).

Evaluación de indicaciones: Proceso en el cual se decide la severidad del estado de la parte o pieza, luego de que la indicación ha sido interpretada. De la interpretación surgirá que la indicación es irrelevante o es una discontinuidad, y en este último caso surgirá que es un defecto o no. Dicha evaluación lleva a decidir, entonces, si la parte o pieza debe ser rechazada, reparada o aceptada (3, 18).

Indicaciones irrelevantes: Las condiciones que las causan están presentes por diseño, por accidente, o por otras características de la pieza que no tienen relación con el defecto que está siendo investigado, por lo tanto se desprecian. Por ejemplo: a) Indicaciones producidas por campos de fuga (campos magnéticos que abandonan o entran a la superficie de la pieza

en una discontinuidad en las propiedades magnéticas o en un cambio de sección de un circuito magnético) en partículas magnéticas (MT). b) Indicaciones producidas por una raya en la película radiográfica en ensayos de radiografía (RT) (3, 18). Las configuraciones de las discontinuidades se dividen en lineales y no lineales. Las discontinuidades lineales exhiben longitudes que son mucho mayores que sus anchos. Las discontinuidades no lineales, tienen básicamente, igual ancho e igual largo. Una discontinuidad lineal que está ubicada en la dirección perpendicular a la tensión aplicada, representa una situación más crítica que una no lineal; debido a la mayor tendencia a la propagación y generación de una fisura. La forma de sus extremos de una discontinuidad determina su criticidad, o efecto sobre la integridad de la estructura. Cuanto más filoso sea el extremo de una discontinuidad, más crítico es, porque una discontinuidad filosa tiene más tendencia a la propagación de una fisura, o a crecer. Nuevamente, esto depende de la orientación respecto de la tensión aplicada. Por eso, si hay una discontinuidad lineal con extremos afilados y en dirección transversal a la tensión aplicada, esto representa la situación más desfavorable respecto a la capacidad de ese componente para soportar una carga aplicada. En general se pueden presentar tres tipos de indicaciones: (3, 18)

Indicaciones alargadas (*Elongated indications*): En general se clasifican como indicaciones alargadas a todas aquellas indicaciones cuya longitud L es mayor a 3 veces su ancho A : ($L > 3A$) (3, 18)

Indicaciones redondeadas (*rounded indications*): En general se clasifican como indicaciones redondeadas a todas aquellas indicaciones cuya longitud L es menor o igual a 3 veces su ancho A : ($L \leq 3A$) (3, 18).

Indicaciones alineadas (*linear indications*): Tres o más indicaciones alineadas aproximadamente paralelas al eje de la soldadura, espaciadas lo suficientemente cerca entre ellas como para ser considerada como una discontinuidad única e intermitente (3).

9. 1. Discontinuidades estructurales en la soldadura

Las discontinuidades más comunes, en orden de sus condiciones de extremo más filosas, empezaríamos con fisuras, falta de fusión, falta de penetración, inclusiones de escoria y

poros. Este orden coincide con las discontinuidades permitidas por la mayoría de los códigos. Hay solamente unas pocas situaciones en las cuáles cualquier tamaño de fisura es permitido. La falta de fusión puede ser tolerada o al menos limitada a un valor máximo. La mayoría de los códigos permiten la presencia de pequeños valores de falta de penetración y de escoria, y algo de porosidad. Dependiendo del tipo de industria y del tipo de servicio pretendido, estos valores pueden variar, pero en general, la presencia de las discontinuidades más filosas es la más restringida. Los defectos como: fisuras, falta de fusión, penetración incompleta, porosidades, inclusiones entre otros tipos de defectos, son conocidos como defectos estructurales de las soldaduras.

Fisuras: Las fisuras o grietas son los más peligrosos de todos los defectos, ya que pueden hacer fallar el material o causan una alta disminución de la resistencia mecánica, ya que los extremos de las fisuras son muy afilados. Hay una tendencia de la fisura a crecer o a propagarse, con la aplicada una tensión. Las grietas superficiales o internas deben ser observadas cuidadosamente durante la realización de soldadura y se deben buscar en el proceso de inspección visual o con técnicas no destructivas. Las causas más comunes de la formación de grietas son: la rigidez de la junta, el enfriamiento rápido de materiales templables y frágiles, con altos contenidos de carbono y azufre, inadecuada selección del electrodo y ajustes pobres con poca penetración. Podemos clasificar las fisuras según sea la temperatura de fisuración en “frío” o en “caliente”. Estos términos son una indicación de la temperatura del metal a la cual la fisura ocurre. Esta es una manera en la cual podemos saber exactamente por qué apareció una fisura. Las fisuras de las juntas soldadas, en frío o en caliente, ocurren por la presencia de esfuerzos multidireccionales localizados, que en algún punto rebasan la resistencia máxima de carga del metal. La tensión que conlleva a la fisura del material puede surgir durante o después de la soldadura. La presencia de una entalla, o de un concentrador de tensiones, puede causar que las tensiones localizadas en la zona de la entalla excedan la resistencia a la rotura del material. Cuando se forman grietas durante la soldadura o como resultado de ésta, generalmente sólo es aparente una ligera deformación de la pieza de trabajo. Después que se ha enfriado la junta soldada, hay más probabilidad de que ocurra agrietamiento cuando el material es duro o frágil. Un material

dúctil puede soportar concentraciones de esfuerzo que pudieran ocasionar falla en un material duro o frágil. El agrietamiento del metal de la soldadura tiene más tendencia a ocurrir en el primer pase de soldadura, que en cualquier otra parte, y de no repararse, continuará pasando a las demás capas de soldadura al ir siendo depositadas. Esta tendencia de continuar hacia las demás capas sucesivas se reduce o se elimina, soldando con metal de aporte austenítico. Cuando se tiene el problema de agrietamiento en el primer pase de soldadura, se pueden mejorar los cordones sucesivos teniendo en cuenta uno o más de los siguientes factores:

- Modificar la técnica de manipulación del electrodo o las condiciones eléctricas, para cambiar el contorno o la composición del depósito.
- Revisar la preparación de la junta y el ajuste.
- Disminuir la velocidad de avance para aumentar el espesor del depósito, aportando con ello más metal de soldadura para resistir los esfuerzos que se están generando.
- Precalentar para disminuir la intensidad de los esfuerzos que se están imponiendo.
- Utilizar electrodos de bajo hidrógeno y secos, aplicando cordones largos cuando se suelden placas pesadas.

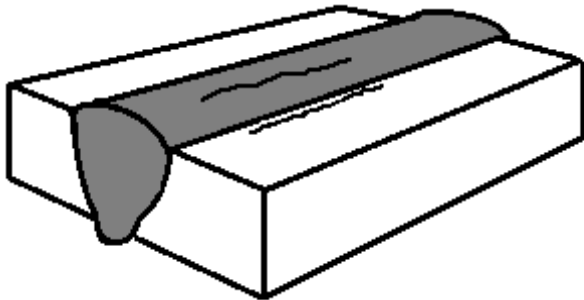
Las fisuras aparecen en el metal base y en el metal de aporte, cuando las tensiones localizadas exceden la resistencia última del material. Las fisuras son defectos y por lo tanto una vez detectadas deben removerse. Las fisuras pueden clasificarse en:

Fisuras en caliente: Se desarrollan mientras el metal solidifica, a temperaturas elevadas. La propagación de estas fisuras es intergranular; esto es entre los granos. Si observamos las superficies de fractura de una fisura en caliente, podemos ver varios colores “de temple” en las caras de la fractura indicando la presencia de alta temperatura en esa fisura (3, 18).

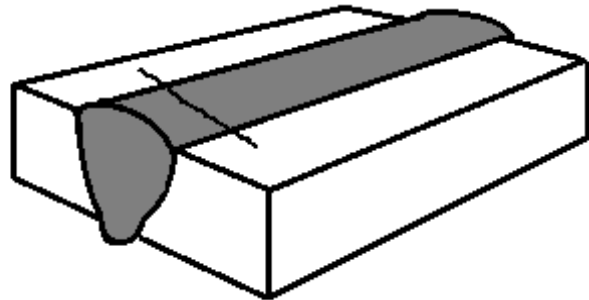
Fisuras en frío: Se desarrollan después de la solidificación alcanzando la temperatura ambiente y son asociadas comúnmente con fragilización por hidrógeno (hidrógeno atrapado). La propagación de las fisuras puede ser intergranular o transgranular, esto es bordeando o a través de los granos respectivamente (3, 18).

Las fisuras pueden ser clasificadas por su dirección con respecto al eje longitudinal de la soldadura. Aquellas que están en dirección paralela al eje longitudinal son denominadas fisuras “longitudinales”. De la misma manera, aquellas fisuras en dirección perpendicular al eje longitudinal de la soldadura son llamadas fisuras “transversales”. Estas referencias direccionales se aplican tanto a las fisuras en el metal de soldadura como a las del metal base.

Fisuras longitudinales: Son paralelas al eje de la soldadura. Las fisuras longitudinales pueden resultar de las tensiones transversales de contracción de soldadura o bien a tensiones asociadas a las condiciones de servicio. En soldaduras de arco sumergido, son comúnmente asociadas con altas velocidades y a veces están relacionadas con problemas de porosidad, que no se evidencia en la superficie. Las fisuras longitudinales en soldadura con electrodo revestido aparecen cuando se aplican a secciones muy grandes y frecuentemente son el resultado de un alto grado de enfriamiento y de grandes restricciones. En la figura 9.1a, se observa una fisura longitudinal (3, 18).



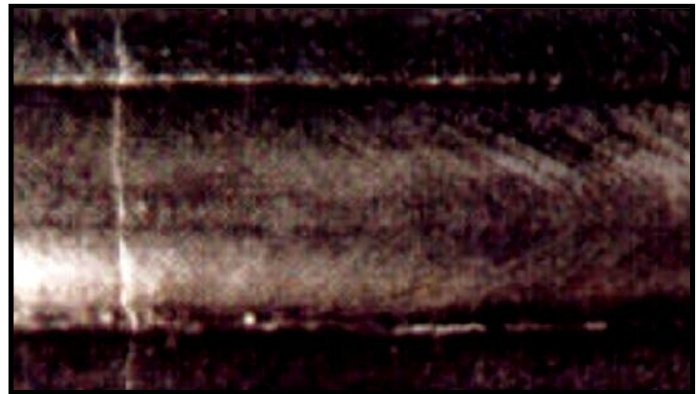
a) Fisuras longitudinales



b) Fisura transversal



c) Imagen de fisura real en tubería



d) Fisura transversal en radiografía

Figura 9.1. Fisuras longitudinal y transversal de soldadura (3)

Fisuras transversales: Generalmente son provocadas por esfuerzos longitudinales debido a contracciones de la soldadura que actúan en metales de baja ductilidad. En la figura 9.1b, se observa una fisura transversal (3, 18).

Se puede diferenciar varios tipos de fisuras dándole una descripción exacta de sus ubicaciones con respecto a las partes de la soldadura. Estas descripciones incluyen fisuras de estrella, garganta, raíz, talón, cráter, bajo cordón, ZAT y las fisuras en el metal base. Las fisuras de estrella o en forma de cráteres “Rechupes” ocurren cuando el arco es terminado incorrectamente; generalmente forman redes con forma de estrella, son superficiales, se forman en caliente. De garganta, cuando son fisuras longitudinales ubicadas en la cara de la soldadura; generalmente, pero no siempre, son fisuras en caliente. Las fisuras en la garganta pueden ser observadas visualmente sobre la superficie de soldadura. Las fisuras de borde son generalmente fisuras en frío; se inician y propagan desde el borde de la soldadura, donde se concentran los esfuerzos de contracción; se inician perpendicularmente a la superficie del metal base. Estas fisuras son generalmente el resultado de contracciones térmicas actuando en la zona afectada térmicamente (ZAT). Las fisuras bajo el cordón y fisuras en la ZAT: Son generalmente fisuras en frío que se forman en el metal base de la zona afectada térmicamente. Son generalmente cortas, pero pueden unirse para formar una fisura continua. Las que se dan bajo el cordón pueden convertirse en un serio problema cuando están presentes microestructuras poco dúctiles y altos esfuerzos residuales. Son encontrados a intervalos regulares bajo la soldadura y también por el contorno de esta zona donde los esfuerzos residuales son máximos.

Fisuras laminares (*lamellar tears*): son fracturas en forma de terraza en el metal base, con orientación básicamente paralela a la superficie forjada. Son causadas por altos esfuerzos en la dirección del espesor que resultan del proceso de soldadura. Se pueden extender largamente, iniciándose en regiones donde el metal base tiene inclusiones no metálicas coplanares y/o en áreas del metal base sujetas a altos esfuerzos por la soldadura. La fractura usualmente se propaga desde un plano laminar a otro por corte a lo largo de líneas que son casi normales a la superficie laminada. En la figura 9.2, se observa un esquema de las fisuras que aparecen en la soldadura.

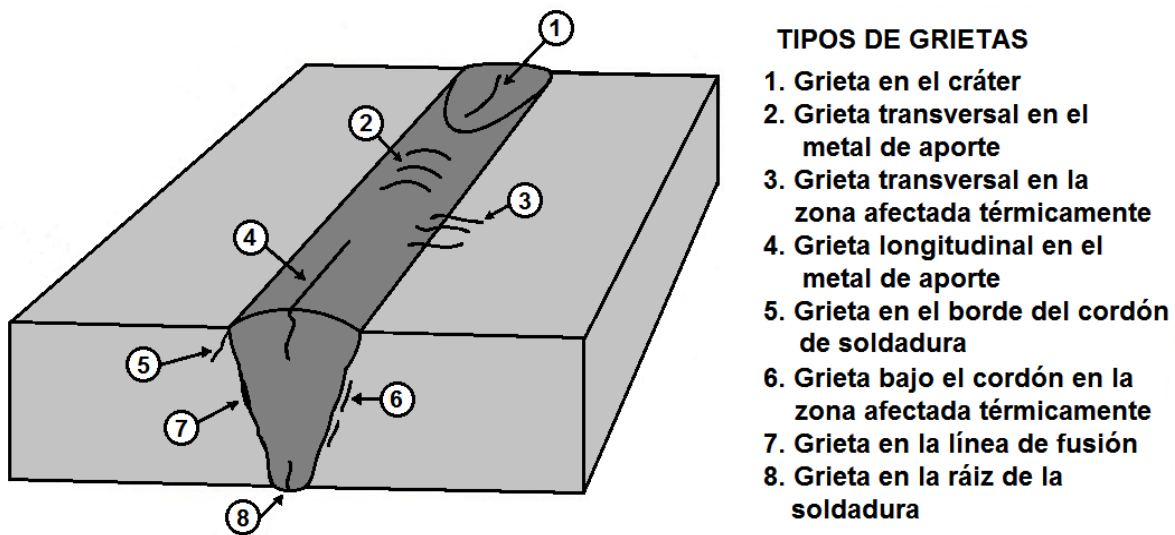
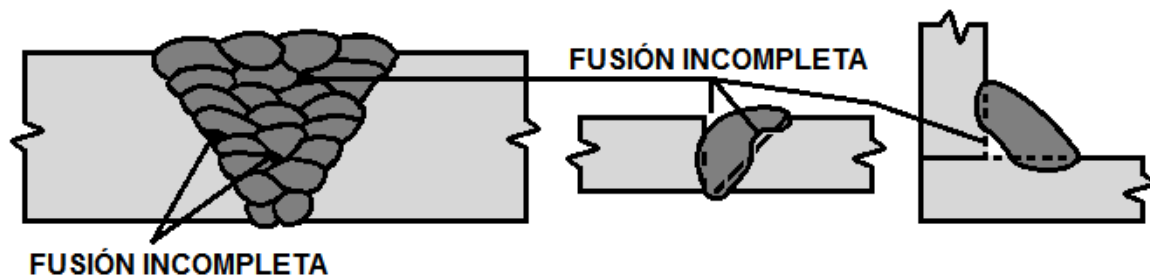


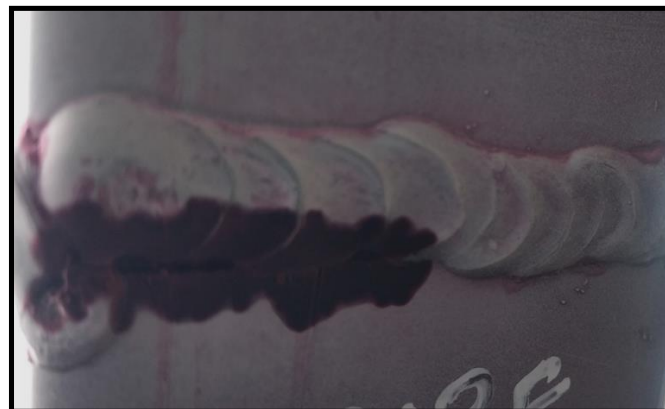
Figura 9.2. Esquema de las grietas o fisuras que pueden aparecer en la soldadura (3)

Falta de fusión: Es una discontinuidad bidimensional de la soldadura que se debe a la falta de fusión simultánea de los bordes del chaflán del metal base y el metal de aporte o entre los cordones de la soldadura, también es causada por un exceso de metal de soldadura en el pie de la soldadura dentro de los límites de fusión; esta condición produce muescas que son perjudiciales, debido a la concentración de esfuerzos bajo cargas. Debido a su linealidad y a su condición de extremadamente filosa, la falta de fusión representa una discontinuidad muy peligrosa en la soldadura. Puede ocurrir en distintas ubicaciones dentro de la zona de soldadura. Este defecto puede ser producido por interposiciones, entre el metal base y el metal de aporte, de materia extraña que no llega a disolverse (óxidos), preparación inapropiada del metal base, mal diseño de la junta, por la acción del fundente o en algunos casos por la inclinación incorrecta del electrodo, el insuficiente aporte de calor de soldadura, falta de acceso a todas las superficies o ambas, durante el proceso de soldadura. Estos defectos son graves porque no se pueden detectar por medio de inspección radiografía normal, pero pueden ser evitados trabajando con intensidades de corriente adecuadas, buena limpieza del chaflán, llevando una adecuada inclinación del electrodo que permita fundir ambas superficies a la vez (3, 18). Otro término para falta de fusión es pase frío (cold lap). Término que a menudo es mal usado para describir la falta de fusión entre el

metal de soldadura y el metal base o entre distintas pasadas de cordones de soldadura, especialmente usado cuando se utiliza GMAW en transferencia corto circuito, ya que el soldador se debe concentrar en dirigir el arco de soldadura a cada ubicación de la junta que deba ser fundida. De otra forma, habrá áreas que no se fundirán completamente. Es muy difícil detectar la falta de fusión con radiografía a menos que el ángulo de radiación sea orientado adecuadamente. Generalmente, la falta de fusión es adyacente a la superficie del bisel original y tiene ancho y volumen pequeño, lo que dificulta la resolución radiográfica a menos que este alineado con la discontinuidad. Si la falta de fusión es radiográficamente visible, generalmente va a aparecer en la placa como líneas más densas y oscuras que son generalmente más rectas que las imágenes de fisuras o escoria alargada. La posición lateral de estas indicaciones sobre la placa va a ser una referencia sobre su profundidad. Por ejemplo, en una soldadura con bisel en $\frac{1}{2} V$, la falta de fusión cerca de la raíz va a aparecer cerca de la línea media de la soldadura mientras que la presencia de falta de fusión cerca de la superficie de soldadura va a aparecer en la radiografía como una imagen posicionada cerca del talón de la soldadura (3). La figura 9.3 muestra esquemas de falta de fusión.



a) Esquemas de falta de fusión



b) Imagen de falta de fusión revelada por líquidos penetrantes

Figura 9.3. Esquemas de falta de fusión o fusión incompleta (3)

Penetración incompleta (*Incomplete joint penetration*): Es una condición donde el metal de soldadura y el metal base no se funden completamente en forma integral en la raíz de la soldadura, donde es requerido una junta con penetración total por una especificación. Su ubicación es siempre adyacente a la raíz de la soldadura. Puede ser ocasionada porque la cara de la raíz de la soldadura de ranura, no alcance la temperatura de fusión para su penetración completa o el metal de la soldadura no llega a la raíz de la soldadura y deje un vacío en el metal de soldadura desde un miembro al otro. Las condiciones de transmisión de calor que existen en la junta son una fuente frecuente de este defecto. Aunque la penetración incompleta puede deberse, en unos cuantos casos, a la falta de disolución de los óxidos e impurezas de la superficie (contaminación excesiva). Generalmente este defecto es causado por una baja intensidad de corriente o un mal diseño del chaflán, en donde la dimensión de la cara de la raíz es demasiado grande, aunque la apertura de la raíz sea adecuada, también puede ser que la apertura de la raíz sea muy pequeña o que el ángulo entre los bordes de la junta de un chaflán en V sea demasiado pequeño, o como también un control lateral inapropiado del arco de soldadura o técnica inapropiada. Las soldaduras en tuberías son especialmente vulnerables a este tipo de discontinuidad, dado que el lado interior es usualmente inaccesible (3, 18).

La mayoría de los códigos ponen límites a la cantidad y el grado de penetración parcial admisible, y varios códigos no aceptan ninguna penetración parcial. Para juntas soldadas de ambos lados, se puede especificar que se remueva el metal de soldadura y el metal base de la soldadura de raíz antes de soldar el otro lado, para asegurarse que allí no hay penetración incompleta. Este procedimiento se denomina en inglés “*back gouging*”. La penetración incompleta es indeseable, particularmente si la raíz de la soldadura está sujeta a tensión directa o a esfuerzos de flexión. El área que no se funde permite concentraciones de esfuerzos que pueden ocasionar fallas sin deformación apreciable. De todos modos, en una junta donde se requiere penetración total, la presencia de falta de penetración es causa de rechazo. En ocasiones se puede necesitar una penetración parcial de la junta, ya que fue especificado por el diseñador y no es necesario una junta con penetración total, en esta

ocasión sólo hay que revisar los tamaños de la soldadura para que cumplan con las especificaciones de diseño. La figura 9.4 muestra una penetración incompleta.

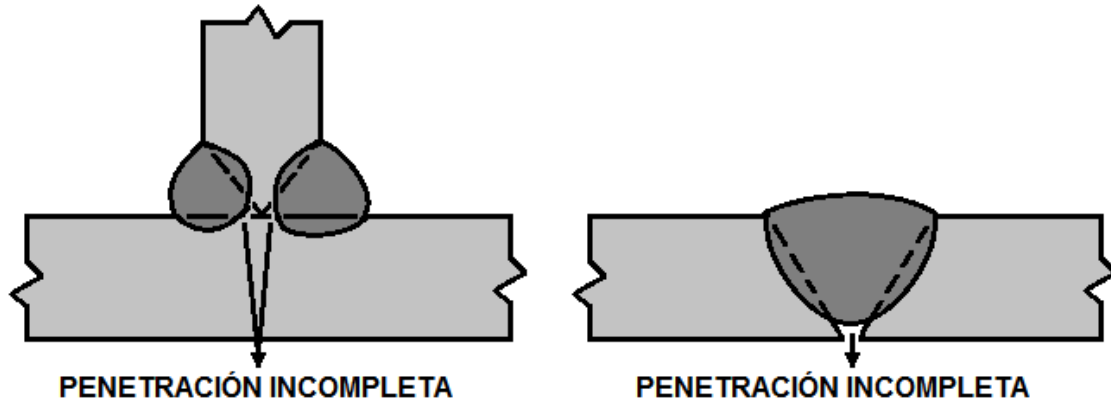
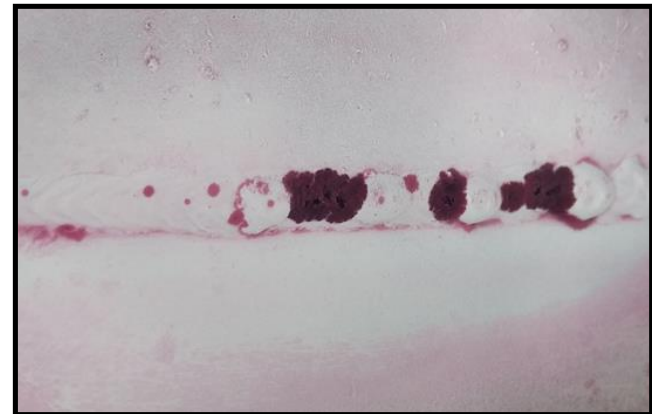
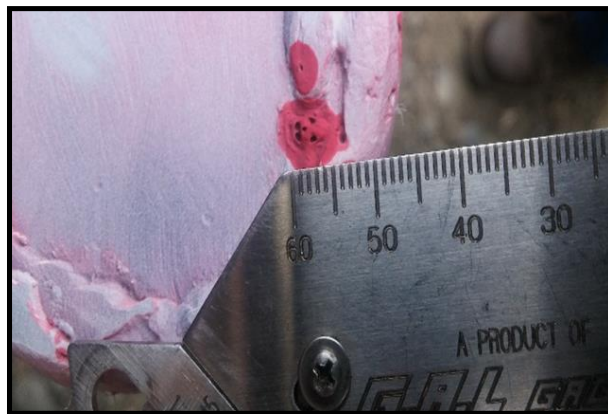
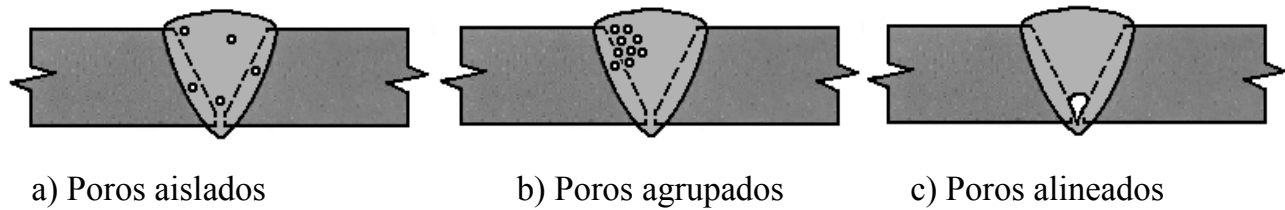


Figura 9.4. Esquema de penetración incompleta (3)

Porosidad: Se denominan poros a los espacios globulares, libre de todo material sólido, que se encuentra con frecuencia en los cordones de soldadura. Estos huecos se forman de las reacciones químicas, con desprendimiento de gases, que tienen lugar durante la aplicación de la soldadura. Los gases que no pueden salir al exterior, por el rápido enfriamiento de la zona de fusión, forman los huecos en el metal de la soldadura, como consecuencia de la reducción de solubilidad al descender la temperatura y de las reacciones químicas que tienen lugar dentro de la propia soldadura. Los poros pueden ser inducidos por factores como una corriente muy baja o alta, manipulación inapropiada del electrodo, electrodos defectuosos, arco demasiado largo o inestable y mala preparación de la junta. Según la distribución y forma los poros se pueden clasificar como aislados, agrupados, alineados y vermiculares (3, 18). Los poros aislados son una porosidad uniformemente distribuida a lo largo de la soldadura; causada por la aplicación de una técnica de soldadura incorrecta o por materiales defectuosos. Cuando la soldadura no se enfría lo suficientemente lento para permitir que la mayor parte del gas pase a la superficie antes de la solidificación, habrá unos pocos poros en la soldadura. Se presentan comúnmente en fundiciones de hierro que están embebidas de aceite (3, 18). Los poros agrupados (*cluster porosity*) es un agrupamiento localizado de poros que generalmente resulta por un inicio o

fin inadecuado del arco de soldadura (3, 18). En la figura 9.5 se observan tres tipos de poros en la soldadura.



d) imágenes de porosidad reveladas por líquidos penetrantes

Figura 9.5. Algunos tipos de poros en la soldadura

Los poros alineados (*linear porosity*): aparecen generalmente a lo largo de la interfase metal de soldadura / metal base, la interfase entre cordones de soldadura, o cerca de la raíz de soldadura, y pueden ser causados por la contaminación que provoca el gas por su evolución en esos sitios o por esfuerzos en la unión, como en el caso de falta de penetración. La importancia de estos poros dependerá del diámetro y la distancia entre ellos (3, 18).

Los poros vermiculares (*piping porosity*): se presentan por la introducción de oxígeno o vapor de agua al baño de metal fundido, puede tener forma esférica o alargada, también se originan por un exceso de azufre en el acero. Este tipo de porosidad de soldadura se extiende desde la raíz hasta la superficie de la soldadura. Cuando uno o más poros son vistos en la superficie de la soldadura, un cuidadoso descarnado puede también revelar porosidad subsuperficial. De todas formas, muchas de las porosidades vermiculares encontradas en soldaduras no se extienden hasta la superficie (3, 18).

La porosidad alargada en la raíz (*hollow - bead porosity* (HB)): es definida como una porosidad alargada alineada a lo largo de la línea central de la soldadura que ocurre a lo largo del cordón de raíz de la soldadura (3, 18).

Inclusiones: a) Inclusiones de escoria (*slag inclusions*): Son los óxidos y otros sólidos no metálicos que se encuentran atrapados en el metal de soldadura o entre el metal de soldadura y el metal base, en forma de inclusiones alargadas y globulares en los cordones de soldadura. Durante la formación del metal fundido y la subsiguiente solidificación del metal de la soldadura, tienen lugar muchas reacciones químicas entre los materiales (fúndente, escoria y metal de soldadura, elementos aleantes), algunos de los productos de dichas reacciones son compuestos no metálicos, que debido a su menor densidad, tienden a buscar la superficie exterior del metal fundido, pero en ocasiones el depósito dificulta su ascenso y la escoria queda atrapada dentro del cordón de soldadura, debido a muescas agudas en la interfase de metal base y de soldadura, o entre los cordones de soldadura. Aunque este defecto puede ser provocado por varias causas como la alta viscosidad del metal de soldadura, la rápida solidificación, la baja temperatura, manipulación inapropiada del electrodo, la más general es la falta de limpieza en la zona de soldadura por no remover toda traza de escoria del cordón de soldadura anterior (3, 18).

b) Inclusiones de tungsteno: Son partículas de tungsteno atrapadas en el metal de soldadura y son exclusivas del proceso GTAW (TIG). En este proceso, un electrodo de tungsteno no consumible es usado para crear el arco entre la pieza y el electrodo. Si el electrodo es sumergido en el metal, o si la corriente es fijada en un valor muy alto, se depositarán gotitas de tungsteno, o se romperá la punta del electrodo y quedará atrapado en la soldadura. Dichas inclusiones aparecen como manchas claras en la radiografía, pues el tungsteno es más denso que el acero y absorbe más radiación. Casi todas las demás discontinuidades, incluyendo las inclusiones de escoria, se muestran como áreas oscuras en las radiografías porque son menos densas que el acero. En la figura 9.6 se observan diferentes tipos de defectos en la soldadura (3, 18).

Socavado o mordeduras (*undercut*): El socavado o mordeduras son surcos o canales que se puede presentar sobre el metal base, en uno o en los dos lados contiguos al cordón de soldadura. Este defecto puede producirse por una fusión excesiva del metal base,

acompañada de una alta velocidad de avance o una oscilación lateral pequeña del electrodo. Una alta intensidad de corriente o un arco demasiado largo, aumenta la tendencia a producir mordeduras; otro factor que influye es el tipo de revestimiento, ya que un electrodo básico produce más fácilmente mordeduras que uno ácido, por ello, con el electrodo básico hay que avanzar más lento que con el electrodo ácido. Cuando la socavadura es controlada, su longitud está dentro de los límites especificados y no constituye una muesca profunda, no es considerada un defecto de soldadura (3, 18).

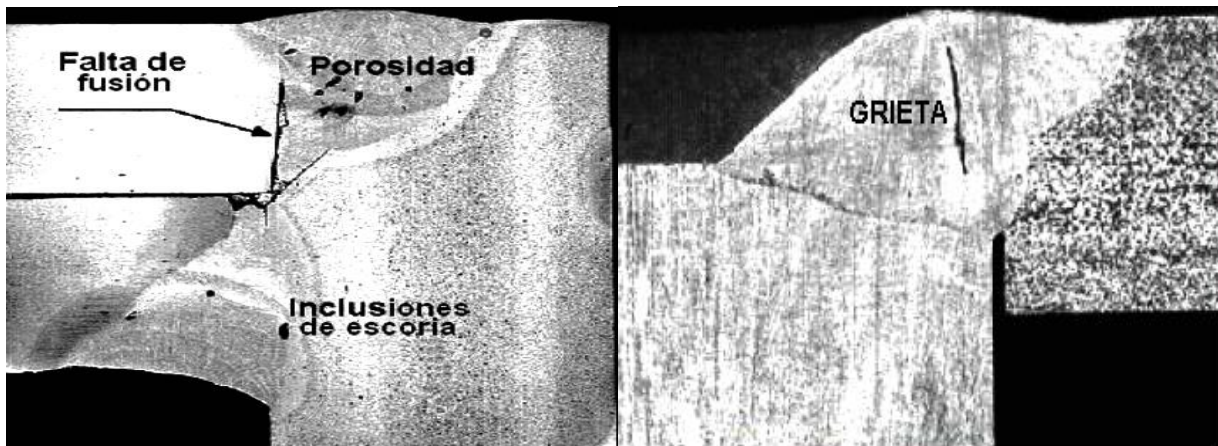


Figura 9.6. Defectos en las soldaduras (8, 18)

Laminaciones (*laminations*): Son discontinuidades planas y alargadas en el metal base, encontrándose normalmente en la parte media del espesor de los materiales forjados (como lo son las planchas de acero utilizadas para construcción de recipientes o tanques, que se producen por laminado (rolado), el cual es un proceso de forja). Las “laminaciones” pueden ser totalmente internas y en este caso serán detectadas sólo mediante ensayos de ultra sonido (UT). Si por el contrario se extienden hasta un borde de la plancha pueden ser detectadas mediante partículas magnéticas (MT) o líquidos penetrantes (PT). Usualmente las normas establecen que no se permitan realizar soldaduras sobre bordes de planchas donde haya afloramiento de “laminaciones”, porque éstas podrían comportarse como fisuras que se propagarán por la soldadura (3, 18).

Golpes de arco / apertura de arco / arranque de arco / (en el material base fuera de la soldadura) (*arc strike*): Imperfección localizada en la superficie del metal base, caracterizada por una ligera adición o falta de metal, resultante de la apertura accidental del

arco eléctrico. Normalmente se depositará sobre el metal base una serie de pequeñas gotas de acero que pueden originar microfisuras; para evitar la aparición de microfisuras esas pequeñas gotas deben ser eliminadas mediante pulido de la superficie afectada (3, 18).

Salpicaduras (*spatter*): Son glóbulos de metal de aporte transferidos durante la soldadura y adheridos a la superficie del metal base, o a la zona fundida ya solidificada. Es inevitable producir cierto grado de salpicaduras, pero deben limitarse eliminándose, aunque sea por estética, de la superficie soldada. Las salpicaduras pueden ser origen de microfisuras (como los arranques de arco sobre el metal base), y simultáneamente son un punto de inicio de la oxidación en superficies pintadas ya que tarde o temprano estos glóbulos podrán desprenderse del metal base, llevando consigo la pintura superficial allí localizada. En la figura 9.7 se observan algunos tipos de defectos en la soldadura (3, 18).

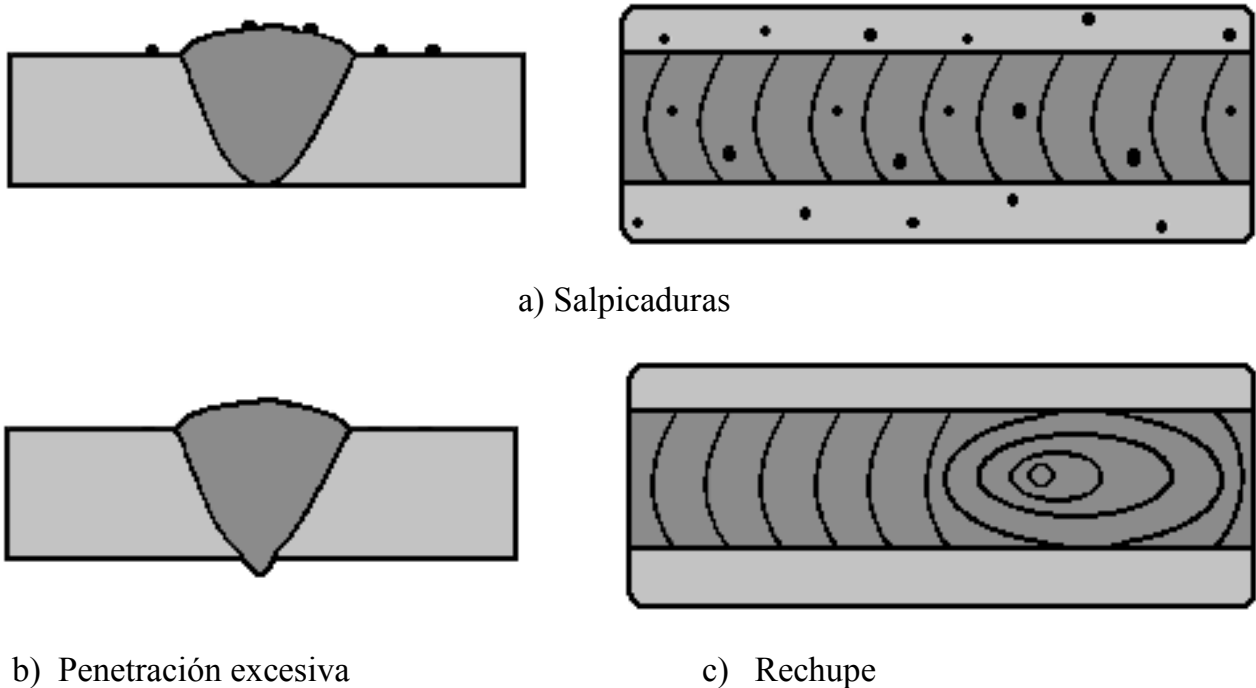


Figura 9.7. Algunos tipos de defectos en la soldadura (8, 18)

Penetración excesiva (*excessive penetration*): En una soldadura simple desde un solo lado (típicamente soldaduras de tuberías), esta discontinuidad representa un exceso de metal aportado en la raíz de la soldadura que da lugar a descolgaduras de metal fundido (3, 18).

Quemón (*Burn - Through (BT)*): Es definida como una porción del cordón de raíz donde una excesiva penetración ha causado que el metal de soldadura sea soplado hacia el

interior, o puede que se descuelgue un excesivo metal fundido. Suele presentarse como una depresión no alargada, en forma de cráter en la raíz (3, 18).

Apariencia superficial insatisfactoria: La forma como el soldador conduce el electrodo, así como un correcto ajuste de la corriente, para el diámetro de electrodo empleado, son factores decisivos para el aspecto y la calidad del cordón terminado. En los catálogos de electrodos está indicado el amperaje máximo, que de ninguna manera debe excederse. Los amperajes normales son inferiores a estos valores en aproximadamente 20 % (3, 18).

En los cordones de soldadura se pueden encontrar irregularidades superficiales, como las ondulaciones en la superficie con chisporroteo, cráter llenado por encima del nivel o incorrectamente llenado y un chisporroteo accidentalmente el arco sobre la placa adyacente a la soldadura. Generalmente el operador es el responsable de los defectos, al utilizar una técnica incorrecta de aplicar el electrodo o por no ajustar bien los parámetros del equipo de soldadura. En algunos casos los electrodos defectuosos o húmedos y un material base inapropiado (alto azufre), pueden causar defectos similares y una apariencia de la soldadura insatisfactoria. Las irregularidades del cordón de soldadura, tales como un cambio abrupto de sección, se considera como defecto de vista; las salpicaduras no son considerados defectos pero son indicaciones de una soldadura inapropiada con probabilidad de que hallan otros defectos en el interior del cordón de soldadura (18). La gravedad de los defectos o discontinuidades estructurales se pueden clasificar en defectos de tipo esférico y defectos de tipo laminar. Los defectos de tipo esférico como porosidades e inclusiones no metálicas, no son muy importantes, a menos que se presenten en grandes cantidades o alineados, ya que son tolerados por varias especificaciones hasta cierta extensión, dependiendo de los requerimientos de la soldadura. Los defectos tipo laminar, como la falta de fusión, falta de penetración y grietas, no son aceptables, aún en las aplicaciones menos críticas (18).

9.2. Discontinuidades dimensionales

Para realizar soldaduras satisfactorias hay que mantener las dimensiones específicas, ya sea en la forma y las dimensiones de las soldaduras o en las dimensiones finales de la estructura

soldada; estos errores se pueden cometer previos a la soldadura o posteriores a la soldadura y los más comunes son: (18)

Distorsiones: consisten en el cambio de dimensiones en la pieza causado por el efecto de expansión y contracción, ya que en este proceso se inducen esfuerzos que pueden torcer (distorsionar) la pieza. Para corregir este defecto se puede requerir de un enderezamiento, con o sin aporte de calor. Se puede también aplicar soldadura de recargue en ciertas zonas y maquinar o sólo maquinar en ciertos casos (3, 18).

Desalineación (*High – Low*): Esta discontinuidad se da cuando en las uniones soldadas a tope, las superficies que deberían ser paralelas se presentan desalineadas; también puede darse cuando se sueldan dos tubos que se han presentado excéntricamente, o poseen ovalizaciones. Las normas limitan esta desalineación, normalmente en función del espesor de las partes a soldar. Es frecuente que en la raíz de la soldadura esta desalineación origine un borde sin fundir (3, 18).

Preparación incorrecta de la junta y desajustes: Se debe tener cuidado en la preparación de la junta y en sus dimensiones, ya que una mala preparación de la junta hace difícil obtener una soldadura sana y aumenta la tendencia a producir defectos en la soldadura, el ajuste juega un papel similar a la preparación de la junta, por lo cual se requiere que la preparación de esta y su ajuste estén dentro de las especificaciones y las normas establecidas para la soldadura (3, 18).

Dimensiones incorrectas de la soldadura: Las dimensiones incorrectas en la soldadura, causadas por dimensiones insuficientes o excesivas a las dimensiones de tolerancias especificadas, se pueden detectar por un simple examen visual o con ayuda de galgas (3, 18).

Contorno incorrecto de la soldadura: La forma y el perfil del cordón de soldadura de acabado pueden tener un efecto considerable sobre el comportamiento bajo carga; mientras que el perfil de un cordón simple tendrá efecto sobre la tendencia de producir defectos, como falta de fusión o inclusiones, cuando se aplique capas posteriores (3, 18).

Convexidad excesiva (*Underfill*): Se produce cuando el metal de soldadura en la superficie de la cara externa, o en la superficie de la raíz interna, posee un nivel que está por debajo de la superficie adyacente del metal base. Este defecto es generalmente causado

por una corriente de soldadura baja o por una técnica de aplicación inapropiada, dicho defecto tiende a producir entallas y falta de fusión (3, 18).

Concavidad excesiva: Este defecto puede ocurrir en el pase de raíz o en la soldadura de filete en posición plana, generalmente es causado por exceso de corriente de soldadura o por un arco muy largo. El tamaño de la concavidad de la soldadura es determinado por el espesor de la garganta y la longitud del brazo, estos defectos pueden causar grietas en el pase de raíz, en soldaduras muy rígidas o macizas. En la figura 9.8 se observan diferentes tipos de defectos de soldadura (3, 18).

Garganta insuficiente (*Insufficient throat*): Puede ser debido a una depresión en la cara de la soldadura de filete, disminuyendo la garganta, cuya dimensión debe cumplir la especificación dadas por el proyectista para el tamaño del filete. Las fallas del soldador pueden ser: a) no obtener fusión del metal base en la raíz de la soldadura, b) no depositar suficiente metal de relleno en el área de garganta (en la cara del filete) (3, 18).

Catetos demasiado cortos (*Insufficient legs*): Es un tamaño menor que el adecuado para su uso, en los catetos de la soldadura de filete. Es de índole similar a la discontinuidad anterior. (3, 18)

Solape o traslape (*Overlap*) (Metal de soldadura apoyado sobre el metal base sin fundirlo): Es la porción que sobresale del metal de soldadura más allá del límite de la soldadura o de su raíz. Se produce un falso borde de la soldadura, estando el metal de soldadura apoyado sobre el metal base sin haberlo fundido (como que se derramó el metal fundido sobre el metal base). Puede resultar por un deficiente control del proceso de soldadura, errónea selección de los materiales, o preparación del metal base inapropiados. Si hay óxidos fuertemente adheridos al metal base, provocarán seguramente esta discontinuidad. Este metal de soldadura, que ha sido derramado sobre el metal base, es una discontinuidad superficial que forma un concentrador de tensiones similar a una fisura y, por consiguiente, casi siempre es considerada inadmisibles (defecto) (3, 18). En Figura 9.8. se observan un esquema de defectos que pueden presentar las soldaduras

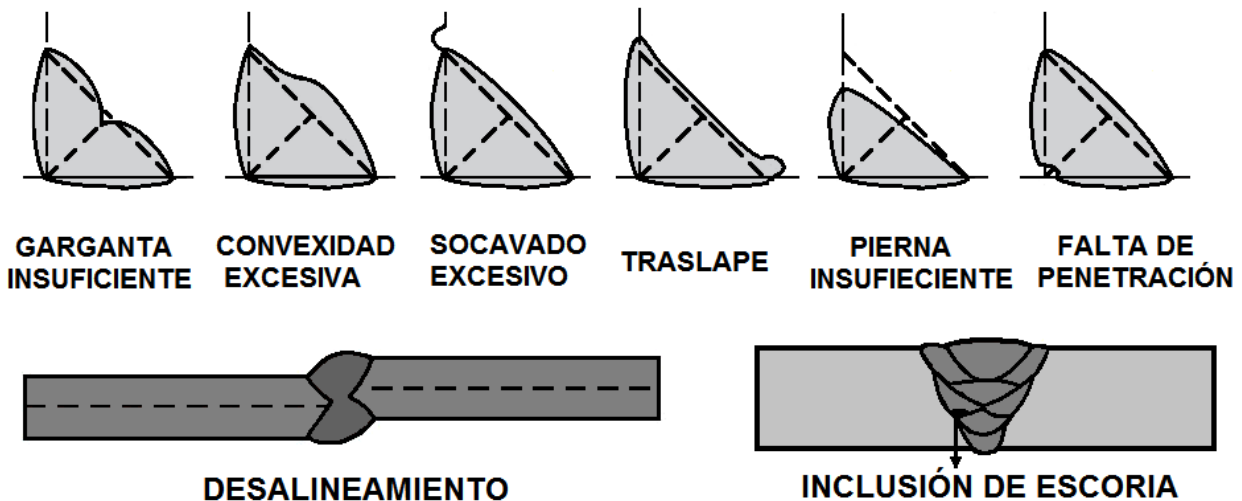


Figura 9.8. Defectos que pueden presentar las soldaduras (8, 18, 86)

Refuerzo excesivo de la soldadura (*Weld reinforcement*): Este defecto de soldadura está relacionado con el chaflán de la soldadura y tiende a hacer rígida la sección en el punto y puede producir entallas, esta condición resulta de una técnica inapropiada de soldadura o una corriente de soldadura baja. La sobremonta (refuerzo excesivo), es un concentrador de tensiones y además, un exceso de ésta aumenta las tensiones residuales presentes en cualquier soldadura, debido al aporte de metal sobrante. Por estos motivos, las normas limitan el valor del refuerzo, que en general no debe exceder de 1/8 in (3mm) (3, 18).

9.3. Propiedades del metal y la junta

En todas las soldaduras se requiere que tengan ciertas propiedades mecánicas y químicas, estos requerimientos dependen de los códigos y las especificaciones involucrados, en donde la desviación de los requerimientos especificados es considerada como un defecto. Las propiedades mecánicas que pueden ser defectuosas son la resistencia a la tracción, resistencia a la fluencia, ductilidad, impacto y dureza, además las propiedades químicas pueden ser deficientes a causa de una composición incorrecta del metal de aporte o del procedimiento de soldadura, lo anterior puede llevar a una pérdida en la resistencia a la corrosión (3, 18).

10. RIESGOS Y PRECAUCIONES DE SEGURIDAD

Todos los procesos de soldadura tienen riesgos particulares para la salud y de seguridad, como en todos los procesos industriales en general, los cuales deben ser identificados y tratados antes de iniciar las operaciones de soldadura para que puedan ser evitados; además, están regulados por las normas ANSI/AWS Z49.1 “*Safety and welding and Cutting*”, en la ANSI Z87.1 “*Standard Practices for Respiratory Protection*” y en la ANSI Z89.1 “*Standard Practices for Industrial Head Protection with low voltaje hazards*”. Los inspectores de soldadura están expuestos a los mismos peligros que los soldadores, ya que trabajan en ambientes similares, por eso se recomienda que el personal que trabaja en estos procesos tenga un buen manejo de las normas y procedimientos de seguridad, en donde intervienen la protección individual, manipulación de gases, operación y mantenimiento de antorchas y porta electrodos, conexiones eléctricas y mantenimiento de equipos entre otros, ya que existen peligros como choques eléctricos, caídas, radiación, riesgos oculares, inhalación de humos y caída de objetos. El inspector de soldadura debe hacer lo posible por trabajar en forma segura, ya que ninguna actividad es completada satisfactoriamente si ocurre algún accidente (2, 3, 87, 88).

La experiencia ha demostrado que los procesos de soldadura con buenos procedimientos de seguridad presentan pocos problemas de salud, pero como en todos los procesos industriales, se requiere de mucha atención a los procedimientos y manejo de equipos. Los trabajos de soldadura por arco conllevan una serie de riesgos entre los que destacan los relacionados con el uso de la corriente eléctrica, los contactos eléctricos directos e indirectos, entre otros. Los principales riesgos de accidente son los derivados del empleo de la corriente eléctrica, las quemaduras, el incendio y explosión. El contacto eléctrico directo puede producirse en el circuito de alimentación por deficiencias de aislamiento en los cables flexibles, en las conexiones a la red o en la máquina. El contacto eléctrico indirecto puede producirse con la carcasa de la máquina por algún defecto de tensión. Las salpicaduras y las quemaduras pueden tener lugar por proyecciones de partículas a las

piezas que se están soldando o al realizar operaciones de limpieza. La explosión e incendio puede originarse por la mala manipulación de los gases comprimidos o al trabajar en ambientes inflamables (2). El uso y mantenimiento apropiado de los equipos se debe enseñar a los usuarios para evitar el uso de partes defectuosas, en donde el entrenamiento en el uso de los equipos de forma segura es fundamental para un trabajo de calidad, además el personal debe ser entrenado en el reconocimiento de peligros potenciales. Si ellos van a trabajar en un medio o situación no habitual, ellos deben ser introducidos en los peligros potenciales involucrados. Por ejemplo, considere una persona que debe trabajar en espacios confinados. Si la ventilación es pobre y se requiere un casco con aire auxiliar, la necesidad y las instrucciones para su empleo deben ser explicadas al empleado. Las consecuencias del uso inapropiado de los equipos deben ser también explicadas. Cuando los empleados creen que las precauciones de seguridad para una determinada tarea no sean suficientes o adecuadas o no las entiendan, deben preguntar al supervisor antes de proceder (2, 3).

Otros factores de riesgo son las exposiciones a radiaciones ultravioleta y luminosas, con distintas intensidades energéticas, nocivas para los ojos, procedentes de la antorcha y del metal incandescente. La exposición a humos y gases conllevan a la inhalación de estos gases tóxicos, los cuales son producidos en el proceso de soldadura, por la ineficiencia o la inexistencia de sistemas de extracción de gases. La intoxicación por fosgeno se produce cuando se efectúan trabajos en las proximidades de cubas de desengrase con productos clorados o sobre piezas húmedas con dichos productos. Quemaduras por salpicaduras de metal incandescente y contactos con los objetos calientes que se están soldando. Incendio y/o explosión durante los procesos de encendido y apagado, por la utilización incorrecta de la antorcha, montaje incorrecto o el mal estado, que pueden producir el retorno de la llama en los procesos de soldadura por oxi-acetileno, o por falta de orden y limpieza. Además, se debe tener cuidados con fugas o sobrecalentamientos incontrolados. Antes de empezar a trabajar, los soldadores y operarios de soldadura deben leer y entender las instrucciones sobre prácticas seguras en el uso del equipo y las hojas técnicas y de seguridad del material usado. Algunas especificaciones AWS utilizan etiquetas de seguridad en el equipo y los materiales. Estas etiquetas brindan información sobre el uso seguro de los equipos y los

materiales, las cuales deben ser leídas y seguidas, ya que contiene información importante sobre los componentes de los electrodos, varillas y fundente. Estas hojas también muestran la composición de los humos generados y otros peligros que puedan surgir durante el uso (2, 3). Los componentes más importantes de un programa de higiene y seguridad efectivo son el liderazgo y la dirección. La gerencia debe fijar objetivos claros en materia de salud y seguridad y mostrar su compromiso mediante el apoyo consistente de prácticas seguras. La gerencia debe designar áreas seguras, aprobadas para las operaciones de soldadura y corte. Cuando estas operaciones sean hechas en áreas diferentes de las designadas, la gerencia debe asegurarse que sean establecidos y seguidos los procedimientos adecuados para proteger al personal y la propiedad. La gerencia debe tener certeza de que solamente son usados equipos y elementos que estén aprobados. Este equipamiento incluye antorchas, reguladores, máquinas soldadoras, porta electrodos y los mecanismos de protección del personal. Debe ser provista una supervisión adecuada para asegurarse que los equipos sean usados y mantenidos de manera correcta. Un entrenamiento efectivo y cuidadoso es un aspecto clave de un programa de seguridad. Los soldadores y otros operadores de máquinas trabajan de manera más segura cuando son capacitados en la materia. Un entrenamiento apropiado incluye instrucción en el uso seguro del equipo y de los procesos, y que las normas de seguridad sean seguidas. El personal debe conocer las normas de seguridad y entender las consecuencias de desobedecerlas. Por ejemplo, los soldadores deben ser entrenados para posicionarse mientras sueldan o cortan, para no recibir en su cabeza los gases o humos que se generan. Una columna de humos es como una nube que contiene diminutas partículas sólidas, que se elevan directamente de la zona de metal fundido. Los humos contienen metales líquidos que se condensaron (2, 3).

10.1. Prevención y protección en procesos de soldadura por arco

En la soldadura por plasma y arco eléctrico se utilizan altos amperajes y voltajes, por lo cual, hay que tener cuidado en la manipulación de estos equipos, como conocer y seguir las normas y procedimientos de uso, además de las normas de seguridad. En el equipo de plasma, los electrodos expuestos de las antorchas deben ser adecuadamente aterrizados y

aislados. Se deben hacer inspecciones periódicas en mangos, conexiones eléctricas, mangueras y líneas de gas. El sistema completo debe ser desconectado antes de iniciarse cualquier tipo de reparación del sistema de potencia, consola o antorcha. Además, los equipos de soldadura por arco eléctrico se deben limpiar frecuentemente para evitar la acumulación de partículas metálicas, las cuales pueden generar problemas para la salud. Los cables de alimentación deben ser de la sección adecuada para no dar lugar a sobrecalentamientos. La carcasa debe conectarse a una toma de tierra asociada a un interruptor diferencial que corte la corriente de alimentación en caso de que se produzca una corriente de defecto o parásita (2, 18). Para aislar de las radiaciones ultravioleta y luminosas, se deben utilizar mamparas de separación de puestos de trabajo para proteger al resto de operarios. El material debe estar hecho de un material opaco y si es translúcido debe ser robusto. La parte inferior debe estar al menos a 50 cm del suelo para facilitar la ventilación. Se debería señalar con las palabras: PELIGRO ZONA DE SOLDADURA, para advertir al resto de los trabajadores (2).

Los procesos de soldadura producen grandes cantidades de radiaciones, por esto los ojos y la cara del soldador y/o operario deberán protegerse adecuadamente contra sus efectos utilizando gafas de montura integral o caretas, combinados con ropas y botas adecuadas al tipo de trabajo que se está realizando. El soldador y/o operario debe utilizar una pantalla facial con certificación de calidad para este tipo de trabajo, utilizando el visor de cristal inactínico cuyas características varían en función de la intensidad de corriente empleada. Para cada caso se utilizará un tipo de pantalla, filtros y placas filtrantes que deben reunir una serie de características en función de la intensidad de la luz. En la Tabla 10.1. Se dan los diferentes tipos de vidrio con filtro para los procesos de soldadura (2).

10.2. Características de los elementos de soldadura por combustión

Además de las dos botellas móviles que contienen el combustible y el comburente, los elementos principales que intervienen en el proceso de soldadura por combustión son los manorreductores, la antorcha, las válvulas antirretroceso y las mangueras. Los

manorreductores pueden ser de uno o dos grados de reducción en función del tipo de palanca o membrana. La función que desarrollan es la transformación de la presión de la botella de gas (150 atm) a la presión de trabajo (de 0,1 a 10 atm) de una forma constante.

Tabla 10.1. Vidrio con filtro recomendados para los procesos de soldadura (2, 3)

PROCESO	INTENSIDAD DE CORRIENTE (A)	PROTECCIÓN MÍNIMA	PROTECCIÓN SUGERIDA
SMAW	Menor a 60	7	
	De 60 a 160	8	10
	Más de 160 a 250	10	12
	Más de 250 a 500	11	14
GMAW y FCAW	Menor a 60	7	
	De 60 a 160	10	11
	Más de 160 a 250	10	12
	Más de 250 a 500	10	14
GTAW	Menor a 50	8	10
	De 50 a 100	8	12
	Más de 150 a 250	10	14
PAW	Menor a 20	6	6-8
	De 20 a 100	8	10
	Más de 100 a 400	10	12
	Más de 400 a 800	11	14
BRAZING			3-4
SOLDERING			2
CAW			12
	ESPESOR	ESPESOR (in)	
OFW	LIVIANO	MENOS DE 1/8	4 o 5
	MEDIANO	DE 1/8 A ½	5 o 6
	PESADO	MÁS DE ½	6 a 8

Los manorreductores están situados entre las botellas y las antorchas. La antorcha es el elemento de la instalación que efectúa la mezcla de gases, pudiendo ser de alta o de baja

presión. Las partes principales de la antorcha son las dos conexiones con las mangueras, dos llaves de regulación, el inyector, la cámara de mezcla y la boquilla. Las válvulas antirretroceso son dispositivos de seguridad instalados en las conducciones y que sólo permiten el paso de gas en un sentido impidiendo, por tanto, que la llama pueda retroceder. Las conducciones sirven para conducir los gases desde las botellas hasta la antorcha, las cuales pueden ser rígidas o flexibles (2).

Los riesgos referentes a los equipos pueden ser evitados siguiendo las recomendaciones y procedimientos especificados por los fabricantes, tanto en el uso como en la inspección y mantenimiento. Hay que tener cuidado con los gases (utilización, manipulación y almacenamiento), agua y conexiones eléctricas que reducen la mayoría de los riesgos y problemas. Aceites o grasas no deben ser usados en equipos de oxígeno, pues puede ocurrir una explosión; sólo lubricantes especiales resistentes a la oxidación pueden ser usados. Presiones de acetileno superiores a 103 kPa (15 psi) son peligrosas y no deben ser usadas. Cuando esta presión sea insuficiente para la aplicación, otro gas combustible debe ser utilizado. Aleaciones con contenidos mayores del 65 % de cobre o plata no deben ser usadas en sistemas de acetileno, ya que se pueden generar compuestos explosivos (2).

10.3. Equipo de protección personal

La protección personal de los inspectores de soldadura es similar al de los soldadores y están descritas en ANSI Z87.1 y Z89.2. Caretas y/o gafas se deben usar para la protección de los ojos, rostro y capuchas o gorros para el cuello durante la operación. Las placas filtrantes deben ser las apropiadas para proteger los ojos de las excesivas radiaciones ultravioleta, infrarrojo, luminosidad visible intensa y partículas proyectadas. El calzado de seguridad debe ser tipo bota, preferiblemente aislante. La ropa (overol) debe proteger contra la radiación, además se deben usar guantes y polainas. Se debe tener toda la protección personal, ya que se está expuesto continuamente a gran cantidad de partículas abrasivas y alta radiación que afecta la salud de los operadores. La ropa de trabajo será de lana o algodón ignífugo. Las mangas serán largas con los puños ceñidos a la muñeca;

además, llevará un collarín que proteja el cuello. Es conveniente que no lleven bolsillos y en caso contrario deben poderse cerrar herméticamente. Los pantalones no deben tener dobladillo, pues pueden retener las chipas producidas, pudiendo introducirse en el interior del calzado de seguridad. Además, el operario no debe trabajar con la ropa manchada de grasa, disolventes o cualquier otra sustancia inflamable. Cuando se trabaje en altura y sea necesario utilizar cinturón de seguridad, éste se deberá proteger para evitar que las chipas lo puedan quemar. Se recomienda usar mascarillas respiratorias debajo de la careta para soldar, para evitar la inhalación de humos metálicos (2, 18, 87, 89). En la figura 10.1 se observa un esquema del sistema de protección personal para un soldador.



Figura 10.1. Esquema del sistema de protección personal para un soldador (90)

10.4. Exposición a humos y gases

Se debe contar con buenos equipos de extracción del polvo y del humo, ya que todos los procesos de soldadura lo producen. Por lo tanto, la extracción o la ventilación adecuada

para quitar este polvo y humo del entorno de trabajo deben ser proporcionadas. Además, si exponen al operador a este ambiente, debe ser considerado un equipo de respiración conveniente. La protección respiratoria es otro punto que debe recibir un cuidado especial, siendo definida en función de la naturaleza, tipo y magnitud de los gases y humos generados. La selección de los dispositivos debe estar de acuerdo con la norma ANSI Z88.2. Esta norma contiene las descripciones, las limitaciones, los procedimientos operacionales, y los requisitos de mantenimiento para dispositivos protectores respiratorios, como lo son las cabinas con sistemas de extracción y recolección de polvos y materiales en suspensión con filtros para ventilar el ambiente y eliminar los humos del proceso (2). Siempre que sea posible se trabajará en zonas o recintos especialmente preparados para ello y dotados de sistemas de ventilación general y extracción localizada suficientes para eliminar el riesgo de inhalación de humos. Es recomendable que los trabajos de soldadura se realicen en lugares fijos, donde el caudal de aspiración de aire recomendado es de 2000 m³/h por metro de longitud. La velocidad del aire en las rendijas debe ser como mínimo de 5 m/s. Cuando es preciso desplazarse debido al gran tamaño de la pieza a soldar, se deben utilizar sistemas de aspiración desplazables. El caudal de aspiración está relacionado con la distancia entre el punto de aspersion y la boca de aspiración. Cuando el trabajo se efectúe en recintos cerrados de pequeñas dimensiones y sin ventilación, el operario deberá estar equipado con un equipo autónomo o con suministro de aire desde el exterior que además cumplirá con la protección contra las radiaciones. A continuación se detallan algunas sugerencias para aplicaciones de soldadura típicas (2).

Soldadura en espacios cerrados o semi-confinados: Un respirador de línea de aire podría utilizarse, el cual se compone de: la máscara o capucha de casco y filtro de polvo, para proteger la cabeza y el cuello y evitar el paso de las partículas despedidas. El flujo de aire mínimo al respirador es 4 cfm (6,6 m³/h) en la parte de la cara y 6 pies cúbico de aire por minuto (10 m³/h) al entrar al casco o la capucha. La fuente de aire al respirador deben ser ventiladores de aire fresco preferiblemente a líneas de aire comprimido. La línea de aire debe suministrar al operario aire limpio y seco y tener un filtro adecuado para quitar los olores, aceites o humedad, y las partículas de óxidos. El filtro de aire de la línea del

suministro no proporcionará la protección contra contaminantes gaseosos, tal como monóxido de carbono, a menos que un purificador de aire separado se utilice. Los respiradores con flujo de aire continuo proporcionan la protección respiratoria adecuada para operaciones de rociado térmico de largas jornadas y en lugares poco ventilados (2).

Soldadura en campo abierto: En áreas de trabajo ventiladas, la protección respiratoria adicional puede no ser necesaria. En casos de trabajo ligero de corta duración, con materiales no tóxicos, pero con exposición al polvo, se deben utilizar mascarillas de filtro aprobadas para la protección contra vapores de metal y polvo. Estos filtros traen almohadillas (y válvulas intercambiables) que se cambian cuando estén sucias o saturadas.

10.5. Exposición al ruido

Al personal que trabaje alrededor de la operación de soldadura se le debe proporcionar una buena protección auditiva, si la exposición del ruido excede las limitaciones establecidas por OSHA "*Occupational Safety Noise Exposure*". Estándares Profesionales de la Seguridad y la Salud. En los procesos de soldadura que producen niveles altos del ruido, es obligatorio limitar al empleado a la exposición al ruido excesivo de acuerdo con estándares reconocidos por la OSHA, además, este organismo exige a los empleadores proporcionar a los empleados condiciones de trabajo seguro, y a los empleados, aplicar las regulaciones y condiciones que su empleador disponga para su propia seguridad. Todos los procesos de soldadura tienen un nivel de ruido específico y se debe controlar el tiempo que se está expuesto al ruido, tal como se puede apreciar en la tabla 10.2. (2).

10.6. Normas de seguridad frente a otros riesgos del proceso de soldadura

Se deben emplear mamparas metálicas de separación de puestos de trabajo para que las proyecciones no afecten a otros operarios. El trabajador debe utilizar pantalla de protección. El filtro de cristal inactínico debe ser protegido mediante la colocación en su parte anterior de un cristal blanco. La instalación de las tomas de la puesta a tierra se debe hacer según las

instrucciones del fabricante. Es preciso asegurarse de que el chasis del puesto de trabajo esté puesto a tierra controlando en especial las tomas de tierra y no utilizar para las tomas de la puesta a tierra conductos de gas, líquidos inflamables o eléctricos. La toma de corriente y la clavija que sirve para unir el puesto de soldadura a la fuente de alimentación deben estar limpias y exentas de humedad. Antes de conectar la toma a la clavija se debe cortar la corriente. Una vez conectada se debe permanecer alejado de la misma. Cuando no se trabaje se deben cubrir con capuchones la toma y la clavija (2).

Tabla 10.2. Duración del nivel de ruido admisible en decibeles (dB) (2, 91)

Nivel de ruido (dB)	Horas / Día
90	8
92	6
95	4
97	3
100	2
102	1.5
105	1
110	0,5
115	Menos de 0,25

Se debe instalar el interruptor principal cerca del puesto de trabajo, para en caso necesario, poder cortar la corriente. Instalar los principales cables de alimentación en lo alto y conectarlos posteriormente. Desenrollar el cable del equipo antes de utilizarlo, verificándolos, para comprobar que su aislamiento no ha sido dañado, también se deben verificar los cables conductores para descubrir algún hilo desnudo. Verificar los cables en toda su longitud para comprobar su aislamiento y que el diámetro del cable sea suficiente para soportar la corriente necesaria. Hay que tener en cuenta que a medida que la longitud total del cable aumenta, disminuye su capacidad de transporte de corriente. Por tanto, para

algunos casos se deberá aumentar el grosor del cable. No utilizar tornillos para fijar conductores trenzados pues acaban por aflojarse (2, 92).

Recomendaciones: Se deben aislar los hilos de soldadura de los cables eléctricos principales para prevenir el contacto accidental con el de alta tensión, así como cubrir los bornes para evitar un posible cortocircuito causado por un objeto metálico y situar el material de forma que no sea accesible a personas no autorizadas. Las tomas de corriente deben situarse en lugares que permitan su desconexión rápida en caso de emergencia y comprobar que el puesto de trabajo está puesto a tierra. El puesto de trabajo debe protegerse de la exposición a gases corrosivos, partículas incandescentes provocadas por el rociado térmico o el exceso de polvo, además, el área de trabajo debe estar libre de materias combustibles. Si algún objeto combustible no puede ser desplazado, debe cubrirse con material ignífugo. Debe disponerse de un extintor apropiado en las proximidades de la zona de trabajo (2).

No se deben bloquear los pasillos. Los conductores deben estar situados en lo alto o recubiertos para no tropezar con ellos. Los cables y conductores no deben obstruir los pasillos, escaleras u otras zonas de paso. El puesto de trabajo no debe situarse cerca de puentes-grúa o sobre los pasillos. La toma de tierra no debe unirse a cadenas, cables de un montacargas o tornos. Tampoco se debe unir a tuberías de gas, líquidos inflamables o conducciones que contengan cables eléctricos. Se debe evitar que el puesto de soldadura esté sobre zonas húmedas y en cualquier caso se debe secar adecuadamente antes de iniciar los trabajos. Los cables no deben someterse a corrientes por encima de su capacidad nominal ni enrollarse alrededor del cuerpo (2).

10.6.1. Normas de utilización de ropa de trabajo y seguridad industrial

El operario debe tener cubiertas todas las partes del cuerpo antes de iniciar los trabajos de soldadura. La ropa manchada de grasa, disolventes o cualquier otra sustancia inflamable debe ser desechada inmediatamente; asimismo, la ropa húmeda o sudada se hace conductora por lo que debe también ser cambiada ya que en esas condiciones puede ser

peligroso. Igualmente, no deben realizarse trabajos de soldadura lloviendo, o en lugares conductores, sin la protección eléctrica adecuada. Antes de iniciar el proceso de soldadura se debe comprobar que la pantalla o careta no tiene rendijas que dejen pasar la luz, y que el cristal contra radiaciones es adecuado a la intensidad o diámetro del electrodo (2). En trabajos sobre elementos metálicos, es necesario utilizar calzado de seguridad aislante. En trabajos en altura con riesgo de caída, se utilizará un cinturón de seguridad protegido para evitar que las chispas lo quemem. El cristal protector debe cambiarse cuando tenga algún defecto (por ejemplo, rayado) y ser sustituido por otro adecuado al tipo de trabajo a realizar. En general, todo equipo de protección individual debe ser inspeccionado periódicamente y sustituido cuando presente cualquier defecto. Se debe inspeccionar periódicamente todo el material y equipos de la instalación de soldadura, principalmente los cables de alimentación del equipo dañados o pelados, empalmes o bornes de conexión aflojados o corroídos, mordazas o bridas de tierra sucias o defectuosas, etc. En ambientes con polvos metálicos se debe limpiar periódicamente el interior con aire comprimido para evitar cortocircuitos o derivaciones a la carcasa (2).

10.7. Normas de seguridad frente a incendios/explosiones en soldadura

Los riesgos de incendio y/o explosión se pueden prevenir aplicando una serie de normas de seguridad de tipo general y otras específicas que hacen referencia a la utilización de las botellas, las mangueras y la antorcha. En caso de retorno de la llama se debe cerrar la llave de paso del oxígeno interrumpiendo la alimentación a la llama interna y cerrar la llave de paso del acetileno y después las llaves de alimentación de ambas botellas. En ningún caso se deben doblar las mangueras para interrumpir el paso del gas, por último efectuar las comprobaciones pertinentes para averiguar las causas y proceder a solucionarlas (2).

10.7.1. Normas de seguridad generales (2)

- Se prohíben los trabajos en locales donde se almacenen materiales inflamables, combustibles o donde exista riesgo de explosión.

- Se debe evitar que las chispas producidas por la antorcha alcancen o caigan sobre las botellas, mangueras o líquidos inflamables.
- No utilizar el oxígeno para limpiar o soplar piezas o tuberías, etc., o para ventilar una estancia, pues el exceso de oxígeno incrementa el riesgo de incendio.
- Los grifos y los manorreductores de las botellas de oxígeno deben estar siempre limpios de grasas, aceites o combustible de cualquier tipo. Las grasas pueden inflamarse espontáneamente por acción del oxígeno.
- Si una botella de acetileno se calienta por cualquier motivo, puede explotar; cuando se detecte esta circunstancia se debe cerrar el grifo y enfriarla con agua, si es preciso durante horas.
- Si se incendia el grifo de una botella de acetileno, se tratará de cerrarlo, y si no se consigue, se apagará con un extintor de nieve carbónica o de polvo.
- Después de un retroceso de llama o de un incendio del grifo de una botella de acetileno, debe comprobarse que la botella no incrementa su temperatura.

10.7.2. Normas de seguridad específicas (2)

- Las botellas deben estar perfectamente identificadas, en caso contrario deben inutilizarse y devolverse al proveedor.
- Todos los equipos, canalizaciones y accesorios deben ser los adecuados a la presión y gas a utilizar.
- Las botellas de acetileno llenas se deben mantener en posición vertical, al menos 12 horas antes de ser utilizadas. En caso de tener que tumbarlas, se debe mantener el grifo con el orificio de salida hacia arriba, pero en ningún caso a menos de 50 cm del suelo.
- Los grifos de las botellas de oxígeno y acetileno deben situarse de forma que sus bocas de salida apunten en direcciones opuestas.
- Las botellas en servicio deben estar libres de objetos que las cubran total o parcialmente.
- Las botellas deben estar a una distancia entre 5 y 10 m de la zona de trabajo.

- Antes de empezar una botella comprobar que el manómetro marca “cero” con el grifo cerrado.
- Si el grifo de una botella se atasca, no se debe forzar el grifo, se debe devolver al suministrador marcando convenientemente la deficiencia detectada.
- Antes de colocar el manorreductor, debe purgarse el grifo de la botella de oxígeno, abriendo un cuarto de vuelta y cerrando a la mayor brevedad.
- Colocar el manorreductor con el grifo de expansión totalmente abierto; después de colocarlo se debe comprobar que no existen fugas utilizando agua jabonosa, pero nunca con llama. Si se detectan fugas se debe proceder a su reparación inmediatamente.
- Abrir el grifo de la botella lentamente; en caso contrario el reductor de presión podría quemarse.
- Las botellas no deben consumirse completamente pues podría entrar aire. Se debe conservar siempre una ligera sobrepresión en su interior.
- Cerrar los grifos de las botellas después de cada sesión de trabajo. Después de cerrar el grifo de la botella se debe descargar siempre el manorreductor, las mangueras y el soplete.
- La llave de cierre debe estar sujeta a cada botella en servicio, para cerrarla en caso de incendio. Un buen sistema es atarla al manorreductor.
- Las averías en los grifos de las botellas deben ser solucionadas por el proveedor, evitando en todo caso el desmontarlos.
- No sustituir las juntas de fibra por otras de goma o cuero.
- Si como consecuencia de estar sometidas a bajas temperaturas se congela el manorreductor de alguna botella utilizar paños de agua caliente para descongelarlas.
- Las mangueras deben estar siempre en perfectas condiciones de uso y sólidamente fijadas a las tuercas de empalme.
- Las mangueras deben conectarse a las botellas correctamente sabiendo que las de oxígeno son verdes y las de acetileno rojas, teniendo roscas en sentidos opuestos.

- Se debe evitar que las mangueras entren en contacto con superficies calientes, bordes afilados, ángulos vivos o caigan sobre ellas chispas; procurando que no formen bucles.
- Las mangueras no deben atravesar vías de circulación de vehículos o personas sin estar protegidas con apoyos de paso de suficiente resistencia a la compresión.
- Antes de iniciar el proceso de rociado térmico se debe comprobar que no existen pérdidas en las conexiones de las mangueras utilizando agua jabonosa, por ejemplo. Nunca utilizar una llama para efectuar la comprobación.
- No se debe trabajar con las mangueras situadas sobre los hombros o entre las piernas.
- Las mangueras no deben dejarse enrolladas.
- Después de un retorno accidental de llama, se deben desmontar las mangueras y comprobar que no han sufrido daños. En caso afirmativo se deben sustituir por unas nuevas desechando las deterioradas.
- La antorcha debe manejarse con cuidado y en ningún caso se golpeará con ella otras partes.
- Nunca colgar la antorcha en las botellas, ni siquiera apagada.
- La reparación de las antorchas la debe hacer técnicos especializados.
- Si la antorcha tiene fugas se debe dejar de utilizar inmediatamente y proceder a su reparación. Hay que tener en cuenta que fugas de oxígeno pueden ser muy peligrosas en locales cerrados.

11. FUNCIONES Y RESPONSABILIDADES DEL INSPECTOR DE SOLDADURA

El inspector de soldadura es el representante de la empresa en la planta o en campo, y es responsable del control de calidad de la soldadura de acuerdo con los códigos y/o especificaciones que se estén aplicando en la construcción soldada. Al efectuar este trabajo, podemos encontrar al inspector de soldadura trabajando en circunstancias muy diferentes, dependiendo primordialmente de la empresa para la cual está trabajando. El inspector de soldadura puede trabajar como representante de calidad de las organizaciones que los contratan o emplean y que puede ser el fabricante, constructor o contratista que produce los bienes soldados; o bien por el comprador de estos; los inspectores de soldadura también pueden ser contratados por una compañía de seguros, una entidad gubernamental, una firma de ingeniería o una agencia de inspección. El inspector de soldadura está capacitado para realizar, testificar, comparar, supervisar, documentar o registrar las diferentes etapas de la inspección que afectan la calidad de las uniones soldadas. Estas actividades se realizan durante la fabricación, construcción, montaje de estructuras y reparación de equipos, entre otras, donde intervienen operaciones de soldadura (2, 12).

De acuerdo con la AWS, el inspector de soldadura puede realizar las funciones de supervisor, especialista y una combinación de supervisor y especialista. El supervisor vigila las actividades de soldadura para que se realicen de forma satisfactoria, utilizando racionalmente los factores productivos mediante el control del personal de soldadura, materias primas, equipos y todos los recursos de la empresa para contribuir con éxito la fabricación de productos soldados. El especialista conoce los equipos y los efectos que producen las soldaduras en los materiales, garantizando la calidad del producto final, para ello coordina las operaciones de soldadura y maneja las normas de construcción de productos soldados y realiza tareas específicas del proceso de inspección. El especialista puede trabajar independientemente del supervisor o puede desarrollar actividades de inspección como el caso de los especialistas en pruebas no destructivas (NDE). Esta

persona ha limitado sus responsabilidades en el proceso de inspección de soldadura, aunque es común ver inspectores que trabajan simultáneamente como supervisor y especialista (3). El inspector de soldadura debe entender cuáles son las limitaciones y cuáles son las intenciones de cada especificación. Además, para poder realizar un trabajo eficiente es necesario que el inspector de soldadura cuente con experiencia, conocimiento y habilidad, ya que debe intervenir en todas las etapas del proceso de fabricación y no es solamente ver soldaduras terminadas, por lo tanto, el inspector de soldadura se considera una persona altamente calificada debido al trabajo que desempeña (2, 3, 11). En la industria actual, hay una gran variedad de especificaciones debido a la complejidad de algunos de los componentes que se construyen en algunas estructuras. Por lo anterior, la inspección de la soldadura incluye especialistas en inspección no destructiva, especialistas en pruebas destructivas, inspectores de código, inspectores del gobierno, representantes del cliente, inspectores del fabricante, etc. Todas estas personas actúan al menos parte de su tiempo, como inspectores de soldadura. Las funciones específicas y generales de los inspectores de soldadura deben ser definidas completamente por las empresas que los emplean, sin embargo, los inspectores de soldadura certificados han demostrado la capacidad de: (1, 2, 4, 93)

- Interpretar planos, símbolos y terminología de soldadura, códigos, normas y otros documentos tales como contratos y órdenes de compra.
- Asegurar que los materiales usados en la aplicación de la soldadura como metales de aporte, electrodos, fundentes y gases, se controlen, mantengan y manejen de manera adecuada para evitar su daño o deterioro, de acuerdo con las recomendaciones de los fabricantes y que además cumplan con los requisitos de las normas y códigos aplicados para la construcción.
- Realizar o verificar la disponibilidad de procedimientos de soldadura que se puedan emplear, asegurando que estén debidamente calificados con respecto al código y normas especificados.
- Realizar la calificación de los soldadores y/o verificar que todos los soldadores estén calificados por un inspector de soldadura certificado.

- Inspeccionar que los equipos de soldadura que se van a emplear están en buenas condiciones de operación y que se ajustan a los procedimientos de soldadura.
- Asegurar que las operaciones de soldadura se estén realizando en estricto cumplimiento con los procedimientos de soldadura y sin salirse de los intervalos de las variables esenciales.
- Supervisar, evaluar, aceptar o rechazar las pruebas de calificación de soldadores y procedimientos de soldadura, inspecciones destructivas y no destructivas de los especímenes correspondientes.
- Preparar planes de inspección de acuerdo a la documentación correspondiente.
- Comprobar en forma visual y dimensional el estado de la soldadura.
- Interpretar, rechazar o certificar que los requerimientos relacionados a la inspección estén de acuerdo con los códigos, normas o documentación que se está aplicando.
- Verificar que las reparaciones se realizan de acuerdo con los procedimientos aprobados.
- Asegurar que los resultados de prueba de la calificación de soldadores y procedimientos de soldadura se están documentando adecuadamente.
- Verificar que la habilidad de los soldadores y operarios de soldadura estén de acuerdo con los códigos y normas especificados en el contrato, y que su calificación cubra todas las variables (posiciones y procesos de soldadura) previstas durante la realización de los trabajos.
- Solicitar la recalificación del personal de soldadura cuando exista evidencia de que éste no cumple con los requisitos de los códigos o normas aplicables.
- Preparar informes de procedimientos de soldadura, soldadores y operarios de soldadura, ensayos destructivos y no destructivos entre otros.

Se debe resaltar que el inspector de soldadura debe diseñar y desarrollar planes de inspección, así como también registrar por escrito todo lo inspeccionado; recopilar, diligenciar y verificar reportes de inspección. Cuando prepare los informes de inspección basado en la información recogida durante el transcurso del proyecto, estos informes deben ser fáciles de comprender, sin caer en excesivos tecnicismos que no lo pueda entender un

soldador, o demasiado simple que no lo pueda comprender un ingeniero. En estos informes se deben especificar las fechas, procedimiento de la inspección, área, ubicación, colaboradores y la firma y/o sello del inspector encargado. Durante la ejecución de los proyectos de construcción de estructuras soldadas, se recomienda que al inicio del proyecto se realicen pruebas no destructivas (PND), a por lo menos un 10 % de las uniones soldadas, y si estas PND llegan a contener defectos, se debe aumentar las pruebas no destructivas al 20 % de las uniones soldadas y si las pruebas no destructivas siguen saliendo con defectos, se recomienda hacer las pruebas no destructivas al 100 % de las soldaduras, ya que se debe estar presentando un problema en la construcción de la estructura soldada que hay que corregir. Cuando en las estructuras tiene soldaduras críticas, (ya que un fallo en la unión soldada puede conllevar al colapso de toda la estructura) se recomienda realizar pruebas no destructivas a todas estas uniones críticas (2).

11.1. Cualidades del inspector de soldadura

El inspector de soldadura es una persona que tiene la obligación de realizar un trabajo profesional y para ello necesita poseer ciertas cualidades básicas entre las que están: (2, 3)

- a. Actitud profesional.
- b. Buena condición física.
- c. Habilidades para interpretar planos y especificaciones.
- d. Experiencia en inspección.
- e. Conocimientos de soldadura.
- f. Conocimientos de métodos de inspección.
- g. Habilidades para recibir entrenamiento.
- h. Habilidades para llenar y mantener registros de inspección.
- i. Buen manejo de personal.

La actitud profesional puede ser la cualidad más importante, ya que muchas veces es el factor de éxito del inspector de soldadura, debido a que la actitud del inspector determina el respeto y cooperación que recibirá de otras personas durante la realización de su trabajo. En

la actitud profesional está incluido el cumplimiento total de nuestros deberes y la toma de decisiones basadas en hechos, de manera que estas decisiones sean justas, imparciales y consistentes con los códigos y normas que se están aplicando en la construcción soldada. (2, 3) El inspector de soldadura debe conocer los requerimientos del producto y del proceso, para que sus decisiones del qué y cómo, sean ajustadas a la realidad y no sean demasiado críticas, ni laxas, ya que las decisiones deben ser tomadas sobre hechos, en donde la condición de la soldadura y el criterio de aceptación deben ser los factores determinantes (2). En la figura 11.1, se observa porosidad aislada en soldadura.

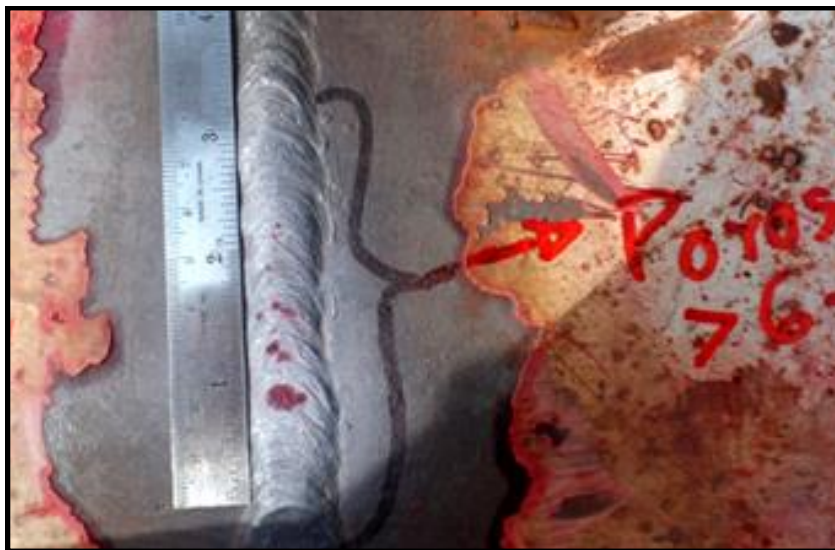


Figura 11.1. Porosidad aislada en una soldadura (2, 94)

El inspector de soldadura debe poseer una buena condición física, ya que frecuentemente las condiciones de inspección son difíciles, debido al calor, altura, medio ambiente, el acceso a la junta, entre otros factores que dificultan la actividad de inspección. La habilidad para examinar visualmente las condiciones superficiales de las soldaduras y juzgar su aceptabilidad, de acuerdo con una norma o especificación escrita, es una función primaria del inspector de soldadura, por lo tanto, el inspector debe poseer buena agudeza visual (mínimo 20/40), ya sea natural o corregida con lentes, además debe tener una buena percepción de colores y para esto debe pasar el examen visual utilizando la carta Jaeger J2 a 12 (2, 6, 95). Los inspectores muchas veces deben ir al lugar donde el soldador estuvo o está trabajando, sin violar los reglamentos de seguridad. En muchas ocasiones, hay que

realizar la inspección de la soldadura inmediatamente después de que el soldador ha terminado, debido a que algunas ayudas que se han puesto para el soldador, como escaleras y andamios no pueden ser removidas, ya que hacen imposible o peligroso el acceso para la inspección (3, 95). El inspector de soldadura debe tener un excelente conocimiento de simbología y terminología de soldadura e inspección, ya que esto le dará la habilidad para interpretar planos, dibujos y especificaciones, porque el inspector debe saber los requerimientos del trabajo, además, no se necesita que se memorice todos los requerimientos, pero sí se requiere saber interpretar los documentos de referencia para poder obtener información rápida y detallada en todo momento durante el proceso de fabricación. Por otro lado, el uso inapropiado de la simbología y/o la terminología, podría crear una situación bochornosa, por lo que es necesario conocer y comunicarse correctamente con el lenguaje técnico (2, 3). El inspector de soldadura debe mostrar evidencia de haber desarrollado funciones como inspectores de soldadura, ya que tener experiencia en inspección de soldadura es muy importante para realizar una inspección más efectiva, debido a que mejora la manera de pensar y de realizar el trabajo de inspección. Lo anterior hace necesario que los nuevos inspectores de soldadura (CAWI – Inspector de soldadura asociado) según la AWS, trabajen bajo la supervisión de un inspector experimentado (CWI- Inspector de soldadura), para que se adquiera adecuadamente el conocimiento práctico; esto queda muy claro en los programas de certificación de la AWS, donde se requiere una experiencia mínima para la certificación como inspector de soldadura (CWI); Estas certificaciones son válidas por tres años y hay tres niveles de certificación; los dos anteriores y (SCWI – Inspector de soldadura Señor), el cual representa el nivel más alto de certificación como inspector de soldadura (2).

El inspector de soldadura debe tener un conocimiento básico de soldadura, procesos de soldadura, ensayos destructivos y no destructivos, para que pueda predecir que discontinuidades pueden ser encontradas en una situación específica, además de entender mejor los problemas que el soldador pueda tener, lo que ayudaría a obtener cooperación y respeto por parte de los soldadores. La experiencia como soldador es deseable pero no obligatoria. Cuando el inspector domina varios procesos de soldadura puede identificar más

fácilmente posibles problemas potenciales antes que de estos ocurran. Aunque los inspectores de soldadura no necesariamente realizan los ensayos destructivos y no destructivos, deben algunas veces presenciar estos ensayos, para mejorar la revisión de los datos de la inspección, además pueden ser consultados si los resultados cumplen con los requerimientos del trabajo bajo la norma aplicada (2, 3, 96). El inspector de soldadura debe tener la capacidad de aprendizaje continuo y su disposición de ser entrenado, ya que de esta manera se logra mejorar la efectividad en la inspección de las soldaduras, lo cual lo hace ser más valiosos para la empresa. El inspector de soldadura debe realizar su trabajo de forma segura, para evitar lesiones y/o accidentes; por lo anterior, todos los programas de entrenamiento deben tener un componente de seguridad industrial (2, 3, 96). Por otro lado, el inspector de soldadura debe desarrollar la habilidad de llenar y mantener los registros de la inspección, para que pueda comunicar con precisión todos los aspectos de la inspección y de esta forma pueda ser entendido por todo el personal de trabajo, ya que los registros de inspección, que sólo puede entender el inspector de soldadura que realizó el registro, son inútiles cuando él está ausente (2, 3, 96). Los reportes deben tener una fácil referencia para que puedan ser fácilmente consultados cuando surja alguna pregunta. En los reportes se incluirán nombre del trabajo, ubicación de la inspección, información específica del ensayo, resultados de la inspección, y cuando aplique, se adicionarán procedimientos de soldadura, calificaciones de soldadura, dibujos o revisiones de especificaciones, ya que la elaboración adecuada de los reportes aumenta la confiabilidad del inspector de soldadura. Si se comete un error en un reporte, según la AWS, este tiene que ser tachado con una sola línea, sin borrar totalmente el error. Esta acción correctiva debe ser indexada y fechada. Para finalizar, el reporte entero debe ser firmado y fechado por el inspector que hizo el trabajo (2, 3, 96).

11.2. Deberes y aspectos éticos del inspector de soldadura

El inspector de soldadura debe actuar con integridad, bajo requerimientos éticos, que son impuestos por la profesión, lo cual implica trabajar con honestidad y lealtad, con sus empleadores, organismos reguladores o cliente entre otros, dado que su función muchas

veces es de responsabilidad pública, debiendo preservar la salud y el bienestar público. Las decisiones de un inspector de soldadura deben estar basadas en hechos que tengan soportes y totalmente contrastables, sin tener en cuenta para quién se hace el trabajo, tomando las decisiones de forma imparcial y consciente, de acuerdo con su moral, responsabilidad y calificación (2, 3, 4). Para reducir la posibilidad de errores de juicio, el inspector de soldadura debe hacer solamente los trabajos para los cuales está debidamente calificado con entrenamiento, experiencia y habilidad. Para mantener la integridad y altos estándares de habilidades prácticas y conducta, en la ocupación del inspector de soldadura, los inspectores de soldadura certificados por la AWS deben tener presente, que cualquier práctica no autorizada está sujeta a la revisión del Comité de calificación y certificación de inspectores de soldadura de la AWS y puede resultar en reprimenda o en la suspensión o la revocación de la certificación (2, 3, 4).

El inspector de soldadura debe tener ética y evitar los conflictos de interés con su empleador o cliente, asegurándose de revelar cualquier asociación de negocio o circunstancia que pueda generar conflicto de interés. Por lo anterior, el inspector no debe aceptar compensación financiera o de otro tipo, por más de una parte, por los servicios prestados sobre el mismo proyecto, a menos que este hecho esté de acuerdo con todas las partes interesadas o por sus agentes autorizados. El inspector debe poseer gran discreción y comunicar los resultados de sus inspecciones solamente a las partes autorizadas en la forma especificada y cuando el inspector deba tomar una decisión que afecta fuertemente la economía de personas o empresas, su actitud debe ser firme y honesta, para decidir, basado en aspectos de seguridad y de confiabilidad, teniendo en cuenta hechos reales y nunca en la posibilidad de obtener un beneficio personal. Además, el inspector de soldadura no debe solicitar o aceptar gratificaciones directas o indirectas, de ninguna parte o partes provenientes del cliente o empleadoras y relacionadas con el trabajo de inspección (2). Los inspectores de soldadura deben ser responsables y cuidadosos con sus opiniones, y deben responder por ellas, por esta razón, deben tener una comunicación efectiva con todo el personal involucrado en la fabricación y construcción de las partes soldadas, siendo esta comunicación en ambos sentidos. Además deben estar listos para recibir observaciones de

todo el personal involucrado como: soldadores, ingenieros de soldadura, ingenieros de diseño, supervisores de soldadores, inspección y producción. Hay que dejar muy claro los requerimientos específicos de calidad de juntas soldadas y mantener prevenido al personal de producción del estado de las inspecciones, para poder corregir los cronogramas de producción cuando sea necesario. Esta comunicación se puede realizar de diferentes formas como: la escrita, hablada, dibujada, gesticulada y con el uso de esquemas y fotografías y se puede emplear uno o varios de estos métodos, en donde lo más importante es que los mensajes enviados y recibidos sean bien entendidos por todas las partes que están involucradas (2). En la figura 11.2, se observa un esquema de comunicación del inspector de soldadura.



Figura 11.2. Esquema de comunicación del inspector de soldadura (2, 3)

El inspector de soldadura solamente firmará aquellos trabajos que él mismo ha inspeccionado o aquellos en los cuales tiene personal bajo su propia supervisión, además, debe presentar credenciales cuando le sean requerida y no podrá dar testimonio

escrito de un nivel de certificación mayor al que tiene, por lo cual debe ser consciente de lo que está escrito en sus reportes o declaraciones. El inspector de soldadura no puede falsificar, exagerar, ni consentir la mala interpretación de sus propias calificaciones profesionales, académicas, logros y responsabilidades pasadas, ni tampoco las de sus asociados, además no puede revelar información patentada o secreta de negocios o procesos técnicos de un cliente o empleador a menos que le den el consentimiento por escrito, excepto cuando resulte necesario para realizar la labor de inspector. Por todo lo anterior, el inspector no puede asociarse, ni patrocinar intencionalmente negocios en donde se puedan falsificar documentos, ni participar en hechos fraudulentos o deshonestos. Para finalizar, el inspector de soldadura no debe pagar, solicitar, ni ofrecer directa o indirectamente ningún soborno o comisión para solicitar empleo profesional, con excepción de la comisión normal requerida por agencias de empleos con licencia (2). El incumplimiento de las normas de conducta establecidas anteriormente, que están relacionadas con el código de ética del inspector de soldadura, se considera una práctica no autorizada, la cual puede llevar a la imposición de sanciones. Además los inspectores de soldadura certificados por la AWS, en sus tres niveles de certificación, deben recertificarse cada tres años, cumpliendo con los requisitos establecidos en la norma AWS para la renovación de su certificación (2).

11.3. Responsabilidades del inspector de soldadura

Para realizar una inspección efectiva de las soldaduras es necesario observar todas las fases de la fabricación, y por consiguiente las responsabilidades del inspector de soldadura se pueden dividir por los puntos revisados antes, durante y después de la aplicación del cordón de soldadura. El diseño de un plan de inspección es tan importante como la inspección misma, por lo tanto, se deben determinar las necesidades y los puntos críticos donde hay que realizar las inspecciones a un equipo o elemento soldado; es muy importante realizar una lista de chequeo de las actividades en secuencia cronológica, y en donde se plantee cómo, cuándo y dónde se realizará la inspección. Esta labor puede ser realizada por el inspector de soldadura señor-SCWI, o el departamento de ingeniería de la empresa, con el soporte de un inspector de soldadura CWI. El plan de inspección genera un beneficio

subjetivo, ya que el soldador, al enterarse del proceso de inspección, se esforzará por efectuar un buen trabajo, además, cuando se hace una buena planificación de las labores de inspección, se obtiene un control absoluto de la gestión productiva. Por otro lado, hay que resaltar que los equipos y herramientas necesarias para realizar todo el proceso de inspección, deberán estar debidamente calibrados por laboratorios normalizados (2).

11.3.1. Inspección previa a la aplicación del cordón de soldadura

Antes de iniciar la producción de soldaduras, es muy importante que el inspector de soldadura revise la documentación correspondiente a planos, normas y especificaciones de la obra, calificaciones de procedimientos de soldadura, calificaciones de soldadores, certificados de materiales y contratos, para identificar las etapas que requieran una inspección más detallada, cuando la obra sea muy grande, se necesitará el apoyo del equipo de ingeniería o el trabajo en conjunto de varios inspectores de soldadura (2).

11.3.1.1. Planos, normas y especificaciones

El inspector debe revisar los planos de construcción de la obra, para asegurar una completa comprensión de la información concerniente a soldadura. Además, el inspector verificará toda la información escrita relacionada con el control de calidad de la soldadura, datos específicos como: manuales de calidad, procedimientos, programas de fabricación, secuencias de soldaduras, etc. Los detalles de planos que se encuentren borrosos o ilegibles, confusos o que estén incorrectos a juicio del inspector, tendrán que ser verificados junto con el cliente o con su representante para su total aclaración en esta etapa de la inspección y en el caso de decidir hacer correcciones, estas se registrarán con fecha y firmas del cliente o su representante, y del inspector. El inspector debe contar con los planos, códigos, normas y especificaciones de la construcción en todo momento durante el desarrollo del proyecto. Además, debe estar actualizando constantemente la información, ya que siempre tiene que trabajar sobre las últimas revisiones y actualizaciones, y al recibir dicha documentación deberá registrarla en un informe (2, 4, 97).

11.3.1.2. Revisión de órdenes de compra y recepción de materiales

En las órdenes de compra se deben identificar todos los materiales que se van a utilizar, estableciendo claramente los requerimientos de calidad. Durante la recepción de estos se debe verificar que los materiales suministrados por los proveedores cumplen con las órdenes de compra, por tal razón, debe verificarse la identificación de los materiales y sus certificados de calidad, en donde están consignados algunos datos como análisis químico, propiedades mecánicas entre otros. Después se debe verificar que las condiciones de almacenamiento sean las correctas, ya que algunos materiales se pueden deteriorar por un mal almacenamiento, como los electrodos de bajo hidrógeno para el proceso SMAW, algunos fundentes y alambres entre otros, debido a que estos elementos requieren de una especial protección contra la humedad (2).

11.3.1.3. Procedimientos de soldadura y calificación de soldadores y operarios

Es responsabilidad del inspector, comprobar la existencia de Especificaciones del Procedimiento de Soldadura “*Welding Procedure Specification (WPS)*”, escritos y sus Registro de Calificación del Procedimiento “*Procedure Qualification Record (PQR)*”, además, debe comprobar que los resultados de los ensayos han sido realizados por expertos y/o laboratorios certificados. El inspector debe tener copias de todos los WPS, PQR, y de las calificaciones de desempeño de los soldadores “*Welding Performance Qualification (WPQ)*”. El inspector revisará la lista de soldadores y operarios de soldadura, los cuales deben de estar calificados, además, debe revisar sus reportes de calificación, junto con los registros de los ensayos realizados, para verificar que las calificaciones de los soldadores cubren los rangos de proceso, espesores, diámetros y posiciones entre otros. En el capítulo 13 se profundizará en este tema. Cuando se requieran calificaciones de procedimientos de soldadura y/o calificación de soldadores y operarios, el inspector podrá actuar (a solicitud del cliente o su representante), como supervisor de dicha operación de calificación (2).

11.3.1.4. Equipos de soldadura

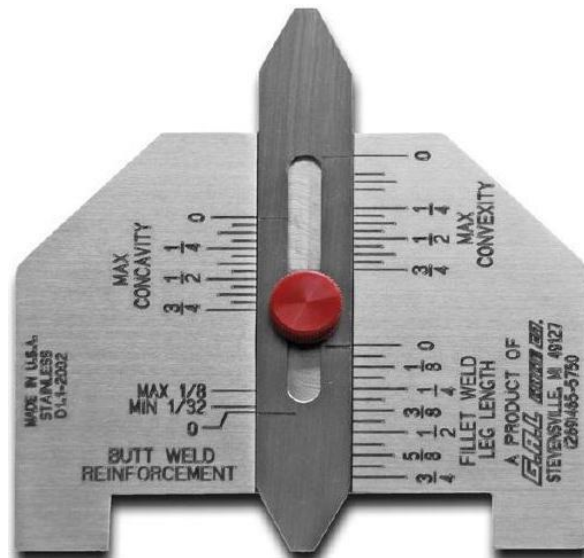
Se deben revisar periódicamente todos los equipos de soldadura, para asegurar la capacidad operacional de estos, así como la calibración y el trabajo seguro. En el programa de mantenimiento de los equipos de soldadura se debe incluir inspección visual y limpieza a intervalos de tiempo que dependen de las condiciones de servicio. En ambientes con mucho polvo, tierra y partículas metálicas, la máquina de soldar se debe limpiar una vez al día; en condiciones más limpias, el mantenimiento se puede hacer vez cada mes. La inspección visual se debe hacer diariamente y se tienen que revisar los cables de alimentación, pinzas y los contactos de los interruptores de rango y selección para ver si hay alguna evidencia de sobrecalentamiento; verificar que las conexiones que van a la terminal de soldadura no estén flojas o mal hechas; asegurándose que no haya ninguna obstrucción en las aspas del ventilador y revisar la operación del contacto primario y de los interruptores para asegurarse que no tengan una operación restringida, además, las operaciones de limpieza y mantenimiento se han de efectuar, previa desconexión de la red eléctrica (2).

11.3.1.5. Limpieza, geometría y arreglo de juntas

La limpieza es un factor crítico en la aplicación de los cordones de soldadura, ya que la humedad, los óxidos, el aceite, la grasa y la pintura, entre otros, pueden provocar que aparezcan poros, falta de fusión y grietas, generando la disminución de la resistencia mecánica de la unión soldada. Adicionalmente, las superficies metálicas limpias, cuando son expuestas al aire atmosférico, se oxidan fácilmente en tiempos muy cortos, además de acumular polvo y humedad, por tal motivo es importante evitar la re-contaminación de la superficie. Otros factores importantes son la geometría y el arreglo de las juntas como: apertura de raíz, bisel, alineación entre otros, los cuales deben cumplir con los códigos, normas y especificaciones. Además, biseles muy angostos pueden provocar falta de penetración y biseles muy amplios consumen más soldadura de la necesaria (2). En la figura 11.3, se muestran algunas galgas para inspección de soldadura BridgeCam y AWS.



a. Galgas BridgeCam



b. Galga AWS

Figura 11.3. Galgas para la inspección de soldadura BrigeCam y AWS (2, 3)

11.3.1.6. Temperatura de precalentamiento

Cuando se requiera de precalentamiento para asegurar una buena soldabilidad y prevenir la degradación de las propiedades mecánicas del metal base, se debe aplicar el precalentamiento entre 2 y 4 in del borde de la preparación de la junta y se debe monitorear a 3 in del bisel, según la buena práctica referenciada por la AWS (2, 3). La temperatura de precalentamiento está en función de la cantidad de carbono equivalente del metal base, del espesor del metal base a soldar y de la temperatura ambiente de trabajo (2).

11.3.2. Inspección durante la aplicación de la soldadura

En la aplicación de los cordones de soldadura, el inspector de soldadura debe verificar que los materiales base y de aporte se encuentran en buen estado y no sean deteriorados por una mala manipulación o almacenamiento inadecuado, ya que por ejemplo, los electrodos que se van a utilizar en el proceso SMAW deben estar en hornos a temperaturas de 120 °C (2, 3). Antes de aplicar el cordón de soldadura, el inspector puede revisar la alineación, posicionamiento, limpieza, ángulo de bisel, apertura de raíz y el ajuste de las partes que se van a unir. Durante la aplicación del cordón de soldadura propiamente dicho, el inspector de soldadura debe constatar el cumplimiento del WPS, ya que en él se especifican todas las variables esenciales y no esenciales de la aplicación del cordón de soldadura. Se debe revisar que se haga una buena limpieza entre pases, para evitar defectos como inclusiones de escoria y falta de fusión, además se debe revisar la temperatura entre pases cuando sea necesario, o cualquier otro aspecto que pueda afectar la calidad de la unión soldada. Lo anterior permitirá una acción correctiva inmediata, lo cual bajará el índice de rechazos en la producción. Para terminar, el inspector de soldadura debe verificar que se cumpla con los ensayos no destructivos, cuando sean requeridos (2).

11.3.3. Inspección después de la aplicación de la soldadura

El inspector de soldadura debe revisar la apariencia de las soldaduras terminadas comprobando las dimensiones específicas (perfil, tamaño y longitud) y que las discontinuidades encontradas como: poros, inclusiones de escoria, falta de fusión, grietas entre otras, no excedan los límites de aceptación de acuerdo al código, norma o especificaciones técnicas aplicadas. Las dimensiones de la pieza soldada pueden cambiar por el proceso de soldadura, ya que puede haber distorsión o desalineación en la pieza soldada, por esta razón hay que realizar las mediciones respectivas para determinar los posibles cambios dimensionales y decidir si la pieza se rechaza o se acepta. Una vez aprobada la inspección visual, el inspector supervisará la realización de los ensayos no destructivos, en donde se requieran o sean determinadas por el contrato de construcción, ya

que el inspector es el responsable de que estas pruebas no destructivas sean realizadas por personal certificado y por ello debe revisar los registros de certificación del personal, procedimientos de aplicación del ensayo y la calibración de los equipos, para las diferentes pruebas no destructivas como inspección radiográfica, ultrasonido, partículas magnéticas, tintas penetrantes entre otras (2). Cuando sean detectadas discontinuidades, el inspector de soldadura las evaluará según el código o norma de construcción que se esté aplicando, para definir si son defectos; si estas discontinuidades son defectos, hay que proceder a repararlos mediante procedimientos de reparación aprobados y volver a re-inspeccionar según corresponda. Además, cuando sea especificado en el WPS un tratamiento térmico post-soldadura (PWHT), el inspector de soldadura debe verificar que el tratamiento se ha realizado correctamente (2). En la figura 11.4, se observa un esquema de la ejecución de una inspección de soldadura.

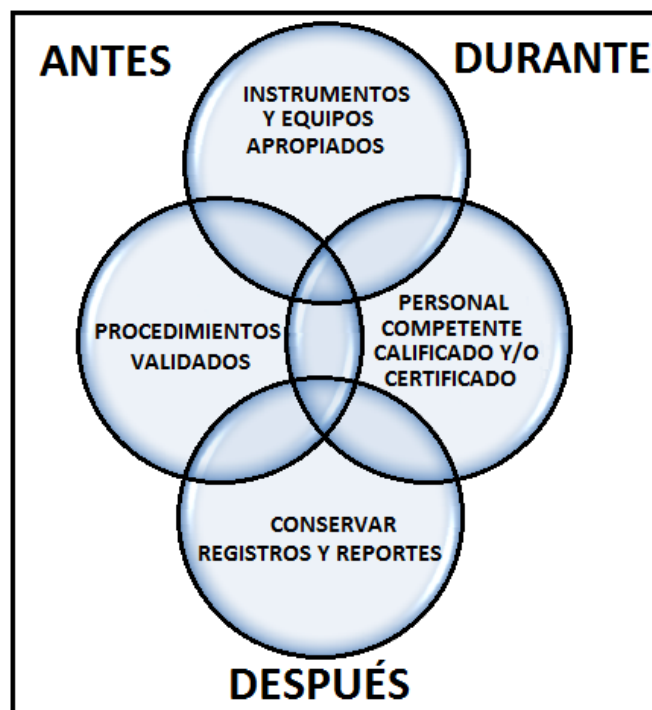


Figura 11.4. Esquema de la ejecución de una inspección de soldadura (2)

Los registros y reportes de inspección se deben conservar, aunque no esté especificado, para facilitar el control de las juntas soldadas, estas deben tener un número de identificación; si la identificación no está considerada en las especificaciones de la obra, el inspector debe asignar un número conforme a las buenas prácticas comúnmente usadas. Los

reportes de inspección deberán ser elaborados en un formato autorizado por la compañía y serán realizados diariamente o cada vez que se requiera. El inspector comprobará que al final del proyecto, el cliente cuente con los reportes de inspección generados; certificados de los materiales base y de aporte; lista de soldadores; reporte de cada soldador, sus calificaciones y referencia de cada soldadura realizada por él; lista de todos los WPS utilizados; copias de todos los WPS, PQR, y WPQ usados en la obra; todos los reportes de inspección no destructiva, incluidos los soportes y cualquier otro registro que hubiese sido necesario dentro de las funciones del inspector (2, 3, 98). En resumen, durante la inspección de soldadura hay que realizar una constante revisión de todo el proceso antes, durante y después de realizar la soldadura y además se requiere conservar los registros y reportes, ya que eventualmente pueden ser necesarios en un futuro (2).

11.4. Programas de certificación de personal en inspección de soldadura

En nuestro mundo desarrollado, existen organismos de normalización dedicados a regular el área de soldadura, estos organismos han elaborado normas y programas de entrenamiento, calificación y certificación del personal dedicado a la inspección de soldaduras. Estos programas y normas determinan la experiencia y el conocimiento necesario para realizar una inspección de soldadura efectiva, lo cual asegura la calidad de los productos soldados. El programa de certificación más importante, difundido y aceptado en el mundo es el implementado por la AWS. Los requisitos correspondientes están establecidos en la norma AWS - QC1:2016 “Norma para la certificación de inspectores en soldadura - AWS”, la cual establece los requisitos para el personal dedicado a la inspección de soldaduras y describe cómo el personal es calificado, enumerando los principios de conducta, y se describen las responsabilidades y obligaciones que se requieren para mantener la certificación. Hay que destacar que la norma AWS-QC1:2016 se refiere al programa de certificación administrado por la AWS, entidad que aplica directamente los exámenes y otorga la certificación al personal. La AWS ha desarrollado un esquema orientado a la certificación interna de inspectores. Este esquema es descrito en la norma AWS QC2, “Práctica Recomendada para el Entrenamiento, Calificación y Certificación del

inspector de soldadura especialista e inspector de soldadura asistente”. Este documento fue desarrollado con el propósito de ayudar, a las organizaciones que emplean personal de inspección de soldadura, a identificar los factores básicos necesarios para el entrenamiento, calificación y certificación de sus inspectores, para cumplir los requisitos y necesidades de una compañía o un proyecto específico (2, 3, 4, 99, 100, 101). Se aclara que el programa de inspectores internos para la compañía no es equivalente a los inspectores CWI de la AWS.

11.4.1. Requisitos para la certificación de inspectores de soldadura

Los requisitos para la certificación como inspector de soldadura se basan en la educación, entrenamiento y experiencia de trabajo, en funciones relacionadas con la inspección de soldadura de acuerdo con algún código o especificación, en donde se deben tener conocimientos relevantes sobre procesos de soldadura y corte, calificación de procedimientos y personal de soldadura, metalurgia, métodos de pruebas destructivas y no destructivas, símbolos y terminología de soldadura, entre otras, así como cumplir con requisitos de agudeza visual cercana y aprobar los exámenes correspondientes. El primer paso hacia la certificación es la documentación de información relevante sobre educación y experiencia de trabajo, ya que para la examinación para ser inspector certificado en soldadura, la persona debe documentar sus estudios, junto con los años de experiencia en trabajos de manejo de algún código o especificación. La AWS permite homologar hasta dos años de experiencia laboral por educación universitaria. Cursos vocacionales y de oficio pueden ser aplicados a la sustitución de experiencia laboral, cuando los cursos se hayan completado y estén referidos a soldadura (hasta 1 año como máximo). Los aspirantes que desean presentar el examen deben cumplir con los requisitos de la tabla 11.1, en la que se relaciona estudios con experiencia laboral (2, 3).

Las personas que califican para presentar el examen de Inspector Certificado de Soldadura AWS, deben hacerlo en tres partes que son: (2, 3)

- **PARTE A- FUNDAMENTOS:** Es un examen a libro cerrado que consiste de 150 preguntas de selección múltiple. Los temas que abarca esta parte del examen

incluye registros e informes, ensayos destructivos, ejecución de soldadura, obligaciones y responsabilidades, examen de soldadura, definiciones y terminología, seguridad, símbolos de soldadura, ensayos destructivos, métodos de ensayo no destructivos, proceso de soldadura, control del calor, metalurgia, conversiones matemáticas y cálculo.

Tabla 11.1. Educación académica y experiencia en soldadura requerida para acceso al examen de certificación como inspector de soldadura según la AWS (2, 6, 102)

Certificación	Nivel académico mínimo	Experiencia
CAWI	Dos años de formación universitaria o tecnológica	6 meses
	8 grado de colegio más 1 año de formación en tecnología de soldadura	3 años
	8 grado de colegio o más	4 años
	Menos de 8 grado de colegio	6 años
CWI	Ingeniería o máster en ingeniería de soldadura o tecnología de soldadura	1 años
	Título universitario o tecnólogo	2 años
	Formación técnica, tecnológica o ingeniería de soldadura	3 años
	Graduado escolar (Bachillerato) + 1 año de formación en técnica de soldadura)	4 años
	Graduado escolar (Bachillerato)	5 años
	8 grado de colegio o más	9 años
	Menos de 8 grado de colegio	12 años
SCWI	Formación en ingeniería de soldadura o master + titulación CWI	11 años
	Formación tecnológica o en ingeniería + titulación CWI	12 años
	Formación técnica, cursos de tecnológica o en ingeniería de dos años + titulación CWI	13 años
	Cursos de formación profesional de 1 año + titulación CWI	14 años
	Graduado escolar (Bachillerato) + titulación CWI	15 años

- **PARTE B- PRÁCTICA.** El examen práctico consta de 60 preguntas y requiere de la medición de réplicas de soldadura con el Kit de inspección AWS, para poder evaluar las réplicas de acuerdo con el libro de especificaciones Part B, el cual es

provisto el día del examen. No todas las preguntas requieren el uso de este libro, pero sí todas requieren de los conocimientos individuales para poder ser respondidas. El examen práctico cubre procedimientos de soldadura, calificación de soldadores, ensayos y propiedades mecánicas, inspección de soldadura y defectos, ensayos destructivos y no destructivos. Los aspirantes deben estar familiarizados con galgas para soldadura a filete y a tope, micrómetros, calibres con comparador y escalas graduadas.

- **PARTE C- EXAMEN DEL CÓDIGO A LIBRO ABIERTO.** Esta parte del examen consiste de 60 preguntas sobre el código que la persona haya elegido para esta parte del examen. Los siguientes códigos son aplicables para esta parte del examen: AWS D1.1/D1.1M, AWS D1.2/D1.2M (Aluminio), D1.5M/D1.5 (Puentes); AWS D15.1 (Ferrocarril); API 1104, ASME Sección VIII, ASME Sección IX, ASME B31.1 y ASME B31.3.

Para completar exitosamente este examen de certificación por la AWS, los aspirantes deben aprobar totalmente las tres partes del examen. El puntaje mínimo para el CWI es del 72 % y para el CAWI es 60 %. Antes de completar el examen, el aspirante debe someterse a un examen de su vista para asegurarse que la persona posea una visión adecuada, ya sea natural o corregida. Después de que todos los exámenes hayan sido aprobados, la persona es considerada calificada para realizar inspección visual de soldaduras. Cuando AWS dice que una persona es un inspector certificado en soldadura, esto simplemente implica que las calificaciones de la persona están documentadas con un certificado apropiado (2, 3).

11.4.2. Niveles de certificación AWS para los inspectores de soldadura

Los inspectores de soldadura certificados son muy importantes en los programas de control de calidad de productos soldados. Para la AWS hay tres niveles o categorías de inspectores de soldadura cada nivel con su alcance de desempeño; se puede considerar que son personas responsables para la evaluación de uniones soldadas (2, 3). Estas personas, para desarrollar bien su labor, deben poseer cualidades físicas, mentales y éticas. Las diferentes

funciones que se realizan en el ejercicio de la inspección de soldadura varían de acuerdo a la responsabilidad, y para su realización se requieren de diferentes grados de conocimientos y pericia del personal que las lleva a cabo, por lo que existen diferentes niveles de competencia para realizar efectivamente dichas funciones. Los requisitos, habilidades y funciones de cada uno de estos niveles de competencia están definidos en los diferentes niveles de certificación. El documento AWS QC1:2016 “Norma para la certificación de Inspectores de Soldadura AWS”, establece tres niveles de certificación que son: (2)

- Inspector de Soldadura Certificado Senior – (*Senior Certified Welding Inspector – SCWI*).
- Inspector de Soldadura Certificado – (*Certified Welding Inspector – CWI*).
- Inspector de Soldadura Certificado Asociado – (*Certified Welding Inspector Associate - CAWI*).

La norma AWS B5.2 “Práctica recomendada para el entrenamiento, calificación y certificación de inspector de soldadura especialista e inspector de soldadura asistente”, por su parte, establece dos niveles de certificación: (2)

- Inspector de Soldadura Especialista – ISE (*Welding Inspector Specialist – WIS*).
- Inspector de Soldadura Asistente – ISA (*Welding Inspector Assistant – WIA*).

Un inspector de soldadura certificado (SCWI) es una persona autorizada para realizar inspecciones, supervisar a uno o varios CWIs, CAWIs y/o personal de END, preparar, revisar e interpretar procedimientos de inspección y de soldadura, auditar proveedores y/u organizaciones que entreguen materiales o servicios para un proyecto; el SCWI se asegura que el trabajo se realiza y que se mantiene la documentación conforme a los requerimientos de las normas aplicables y otros documentos de contrato. Además, un SCWI puede realizar todas y cada una de las funciones que se describen para un CWI o para un CAWI (2, 6). El inspector de soldadura certificado (CWI) es una persona autorizada y altamente especializada, cuya función principal es controlar y asegurar efectivamente la más alta calidad de los trabajos de fabricación, construcción, montaje de equipos, y estructuras e instalaciones en las que intervienen operaciones de soldadura. Es el encargado de aplicar

los criterios de aceptación mediante el seguimiento de un código o norma específicos, velando para que las estructuras cumplan los requisitos de calidad aplicables a su fabricación y uso. El CWI está capacitado para realizar inspecciones y verificar que el trabajo inspeccionado y la documentación se mantienen conforme a los requerimientos de las normas que se apliquen en cada proyecto. El CWI puede certificar la cualificación de los soldadores según los códigos y especificaciones que maneje. Además, un CWI puede realizar todas y cada una de las funciones que se describen para un CAWI (2, 6). El CAWI es una persona autorizada y capaz de realizar inspecciones, bajo la supervisión directa de un SCWI o un CWI, estando al alcance de alguno de ellos por medios visibles y audibles. Es sólo responsabilidad de un SCWI o de un CWI, la certificación de que los componentes soldados, los cuales deben estar conformes a las normas que se usen y al criterio de aceptación de dichas normas (2, 6).

11.4.3. Sistemas internacionales de certificación para inspectores de soldadura

Los países europeos han desarrollado sus propias normas y esquemas para la calificación y certificación de personal de inspección de soldadura. Entre estos puede mencionarse el Esquema de Certificación para el Personal de Soldadura e Inspección del Reino Unido (U.K.'s *Certification Scheme for Welding and Inspection Personnel –CSWIP*), operado por el Instituto de Soldadura (*The Welding Institute – TWI*). Cuando se implantó el esquema europeo de certificación de personal en soldadura, se creó la Federación Europea de Soldadura, Unión y Corte (*European Federation for Welding, Joining and Cutting*), mejor conocida como Federación Europea de Soldadura (*European Welding Federation – EWF*). El primer paso de la EWF se orientó a armonizar el entrenamiento y calificación del personal de soldadura. En 1991 la EWF, conjuntamente con los institutos y organizaciones de soldadura nacionales más relevantes de 27 países, lanzó un esquema armonizado de entrenamiento y calificación en el campo de la tecnología de la soldadura, al publicar los lineamientos que definían los requisitos mínimos necesarios para entrenar a los ingenieros europeos de soldadura (2, 6). Después se desarrollaron otros lineamientos para cubrir diversos niveles profesionales en tecnología de soldadura.

En materias relacionadas con la inspección de soldadura, el esquema armonizado de certificación cubre los niveles de competencia de Ingeniero Europeo de Soldadura (EWE), Tecnólogo Europeo de Soldadura (EWT), Especialista Europeo de Soldadura (EWS) y Practicante Europeo de Soldadura (EWP). El EWF y el Instituto Internacional de Soldadura (*International Institute of Welding - IIW*) realizaron un esquema internacional basado en los lineamientos de educación y procedimientos de calificación de la EWF. Estos dos organismos pueden emitir diplomas de Ingeniero Internacional de Soldadura (IWE), Tecnólogo Internacional de Soldadura (IWT), Especialista Internacional de Soldadura (IWS) y Practicante Internacional de Soldadura (IWP). Por otro lado, los consejos de la AWS, IIW y CSWIP están estableciendo un acuerdo para el reconocimiento mutuo de sus calificaciones respectivas, ya que los programas de certificación de inspectores de soldadura de la AWS tiene mucho en común con los esquemas internacional y europeo, aunque difiere en algunos aspectos claves (2, 4).

12. DOCUMENTOS QUE GOBIERNAN LA INSPECCIÓN DE SOLDADURA

El inspector de soldadura debe tener la oportunidad de estudiar todos los documentos aplicables a la construcción soldada antes de comenzar el trabajo. Este esfuerzo previo a la soldadura provee al inspector la información necesaria sobre la soldadura y los procesos que le tocará realizar. Aunque la inspección de soldadura, para las diferentes industrias, puede ser similar en muchos aspectos, cada trabajo en particular puede tener requerimientos que lo hacen único. Los documentos que debe revisar el inspector de soldadura incluyen planos, códigos, normas y especificaciones. Esto no implica que estos sean los únicos documentos sobre los que se debe estar interesado, ya que el inspector de soldadura es responsable del estudio de todos los documentos que están involucrados en los proyectos de soldadura inspeccionados, esto no significa que el inspector de soldadura deba memorizar los contenidos de dichos documentos. Sin embargo, los inspectores deben estar suficientemente familiarizados con los documentos para ubicar la información que necesita de forma rápida. Por lo anterior, todos los documentos deben estar disponibles para una referencia inmediata cuando surgen las preguntas (2). Los códigos, normas y especificaciones son documentos que rigen, regulan y establecen lineamientos para las diferentes actividades industriales con el propósito de asegurar productos confiables y de calidad. Además, se asegura de que las personas relacionadas en la fabricación de estos productos, no estén expuestas a peligros indebidos, ni a condiciones que pudieran resultar perjudiciales para su salud. Los códigos y normas son realizados, publicados y actualizados por organizaciones gubernamentales y privadas con el propósito de aplicarlos en áreas de su interés. Lo anterior hace que el inspector de soldadura deba conocer los códigos y normas que aplican en sus actividades profesionales, ya que su especialidad es determinar si los productos soldados cumplen con los criterios de aceptación de los códigos, normas, especificaciones y otros tipos de documentos que estén estipulados en el contrato de fabricación de productos soldados. Algunos códigos y normas son muy extensos y su manejo e interpretación pueden resultar un poco difíciles, debido a que los aspectos y

puntos de vista considerados son amplios y muy variados, por esto, el inspector de soldadura debe realizar un esfuerzo por incrementar su dominio sobre la interpretación de este tipo de documentos. Algunas de las principales entidades que generan las normas relacionadas con la industria de la soldadura para Latinoamérica son: (2, 97)

- *American Welding Society* - AWS (Sociedad Americana de Soldadura).
- *American Society for Testing and Materials* – ASTM (Sociedad Americana de Pruebas y Materiales).
- *American Society of Mechanical Engineers* - ASME (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos).
- *American Petroleum Institute* - API (Instituto Americano del Petróleo).
- *Internacional Organization for Standarization* - ISO (Organización Internacional para la Normalización).
- *American Nacional Standards Institute* - ANSI (Instituto Nacional Americano de Normas).
- *American Asosiation of State Highway and Trasportation Officials* –AASHTO (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportación).

Los códigos y normas reflejan el consenso de las partes relacionadas en su área de aplicación, en donde cada organización que revisa y realiza las normas, tiene comités o grupos de trabajo compuestos por representantes de las diferentes partes interesadas y en donde los miembros de esos comités son especialistas en sus campos de acción. Estos grupos realizan borradores o versiones preliminares de los códigos y normas, para que sean revisados por grupos más amplios antes de aprobar la versión final. En el ámbito internacional opera la organización internacional para la normalización (ISO) creada para desarrollar un conjunto común de normas para la manufactura, el comercio y las comunicaciones. La ISO está compuesta por más de 120 países miembros y la integran aproximadamente 180 comités técnicos que realizan normas preliminares para que sean aprobadas. Lo anterior es muy importante ya que los códigos, normas y especificaciones son documentos que regulan a las actividades industriales. Aunque estos documentos, de uso común en la industria, tienen diferencias en cuanto su extensión, alcance, aplicabilidad

y propósito, sirven para mejorar la calidad de los productos y trabajar de forma más segura y eficiente (2).

12.1. Códigos, normas y especificaciones

El código es definido por la AWS como un cuerpo de leyes de una nación, ciudad etc., arreglado sistemáticamente para una fácil referencia. Como el código contiene reglas de carácter legal, estos son considerados obligatorios (2, 3). Los códigos contienen un conjunto de requisitos y condiciones que se pueden aplicar a uno o más procesos para regular de manera integral el diseño, materiales, fabricación, construcción, montaje, instalación, inspección, pruebas, reparación, operación y mantenimiento de instalaciones, equipos, estructuras y componentes específicos (2, 3). El término “Norma (*Standar*)” tal y como se emplea por la AWS, ASTM, ASME y ANSI, se aplica colectivamente sin distinción a los códigos, especificaciones, métodos, prácticas recomendadas, clasificaciones, definiciones de términos, guías y símbolos; los cuales han sido realizados y adoptados por una organización de cierta sociedad técnica (2, 3). Las normas de soldadura que se aplican en toda Latinoamérica son publicadas por la sociedad americana de soldadura (AWS), en cooperación con el Instituto Nacional Americano de Normas (ANSI). Las normas son consideradas como obligatorias “*Mandatory*”, como el caso de los códigos y también no obligatorias “*Non Mandatory*” como el caso de prácticas recomendadas. Se debe tener en cuenta algunas palabras claves que se emplean en las normas de uniones soldadas, para asegurar la correcta interpretación. *Shall* y *Will* (tiene que), se emplean para requisitos obligatorios y se encuentran frecuentemente en códigos y especificaciones. *Should* y *Could* (Podría y debería), se emplean para requisitos no obligatorios, pero se recomienda como una buena práctica y se usan frecuentemente en prácticas recomendadas y guías. En algunas ocasiones, normas no obligatorias se vuelven obligatorias cuando son referenciadas por un código. Un ejemplo es la práctica recomendada de la sociedad americana de pruebas no destructivas “ASNT” SNT-TC-1A, la cual establece guías para la calificación y certificación de personal en pruebas no destructivas; como en la sección 6 del

código AWS D1.1/D1.1.M: 2015, requiere que el personal de pruebas no destructivas esté calificado de acuerdo con SNT-TC-1A; en este caso, esta práctica se vuelve obligatoria (2). La especificación difiere del código en que describe de forma clara y concisa los requisitos esenciales y técnicos para un material, producto, sistema o servicio, indicando los procedimientos, métodos, clasificaciones o equipos a emplear para poder determinar que los requisitos especificados para el producto han sido cumplidos o no; mientras que el código describe un alcance muy grande de construcción o fabricación. Las prácticas recomendadas y guías son normas que dan asistencia por medio de la descripción de reglas y principios sobre una actividad específica, para que los usuarios puedan entenderlos y aplicarlos de manera adecuada antes de emplear algún proceso, técnica o método. Las clasificaciones son normas que establecen arreglos o agrupación de materiales, procesos o productos de acuerdo con las características que tienen en común, tales como origen, uso, composición, propiedades o procesos de fabricación (2).

12.2. Alcance y aplicación de las normas

La normalización es la aplicación de normas para solucionar problemas reales o potenciales, en donde se favorece el desarrollo técnico, económico y la mejora de la calidad de vida. La normalización implica la participación de personas que representan a distintas organizaciones de los sectores involucrados como productores, consumidores y gobierno. La globalización de las actividades industriales y comerciales impone el empleo de normas internacionales para el suministro de bienes y productos. El cumplimiento de los requisitos de las normas es obligatorio cuando tales normas están referidas o especificadas en las jurisdicciones gubernamentales, o cuando estas están incluidas en contratos o documentos de compra. El usuario de la norma debe conocer completamente el alcance, uso y el campo de aplicación de esta, además, debe reconocer los aspectos no cubiertos por el documento. Cuando el uso de una norma es obligatorio, como resultado de una regulación gubernamental o de un acuerdo de compra y venta, es esencial conocer la edición particular del documento que debe ser empleado. Desafortunadamente, se pueden encontrar situaciones en las que se especifican ediciones obsoletas de la norma, y tales ediciones

deben ser seguidas a fin de dar cumplimiento a estos requisitos estipulados. Siempre que existan dudas en cuanto a las ediciones de los documentos a ser usados, esto debe aclararse antes de iniciar los trabajos (2, 3, 4).

12.2.1. American Welding Society (AWS)

La Sociedad Americana de Soldadura (AWS), publica numerosos documentos de soldadura como códigos, normas y especificaciones entre otros, los cuales cubren los usos y el control de calidad de materiales, productos, operaciones y procesos de soldadura. Los códigos más relevantes de la AWS son: (2)

* **Código de soldadura de acero estructural “AWS D1.1/D1.1M: 2015, *Structural Welding Code-Steel*”**: Este código se aplica a estructuras de acero al carbono y baja aleación cuando el espesor del metal base es mayor a 1/8 in (3mm) y se puede emplear conjuntamente con otros códigos, normas o especificaciones de diseño y construcción de estructuras de acero. Este código **no cubre** la construcción de recipientes y tuberías a presión o aceros con un límite mínimo de fluencia, mayor a 100000 lb/in² (690 MPa). Este código explica con detalle los requisitos para el diseño, fabricación, inspección y reparación de elementos estructurales en platina y tubería que estén sometidos a esfuerzos estáticos, también cubre los procedimientos de soldadura y calificaciones de soldadores. Las secciones que componen este código son:

Parte 1. Generalidades; contiene el alcance y limitaciones.

Parte 2. Diseño de uniones soldadas en elementos tubulares y no tubulares.

Parte 3. Precalificación de procedimientos de soldadura.

Parte 4. Calificación de procedimientos de soldadura y personal (soldadores, operarios entre otros).

Parte 5. Requisitos de fabricación, incluyendo metales base, consumibles y tolerancias.

Parte 6. Requisitos de inspección y criterios de aceptación para varios END.

Parte 7. Diseño de soldaduras con pernos (*stud welding*), producción y requisitos de inspección.

Parte 8. Enderezado y reparación de estructuras ya existentes.

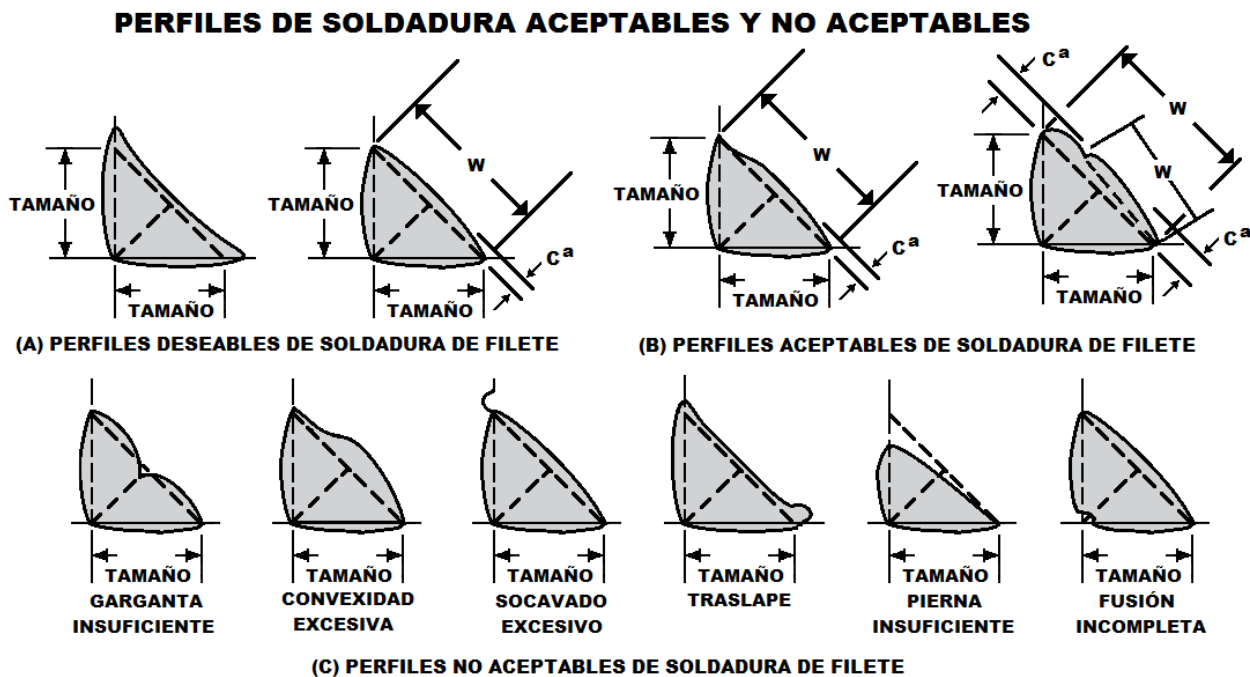
Anexos. Contiene anexos normativos y anexos informativos y algunos comentarios sobre el código de soldadura de acero estructural.

* **Código de soldadura estructural-Aluminio “AWS D1.2/D1.2M: 2014, *Structural Welding Code-Aluminum*”:** Este código contiene los requisitos de soldadura para cualquier tipo de estructura fabricada en aleaciones de aluminio estructural, a excepción de recipientes a presión de aluminio y tuberías que transporten líquido. En las secciones 1 a 7 están los requerimientos de diseño, fabricación e inspección en la soldadura de aluminio. También contiene las reglas y regulaciones necesarias para el empleo de los procesos GMAW, GTAW, PAW y SW de las estructuras en aluminio no tubulares, dinámica o estáticamente cargadas, así como las estructuras tubulares (2, 104). En la figura 12.1, se observan los perfiles de soldadura en filete aceptable y no aceptable según la parte B del libro de evaluación de especificaciones de la AWS (2, 86).

* **Código de soldadura estructural-lámina de acero “AWS D1.3/D1.3M: 2008, *Structural Welding Code-Sheet Steel*”:** Este código contiene los requisitos para la soldadura de láminas de aceros al carbono y de baja aleación con o sin recubrimiento de galvanizado, además el espesor del material base debe ser igual o menor de 3/16 in (4.8 mm) y su resistencia mínima a la fluencia no sea mayor a 80 KSI (550 MPa). Bajo este código se puede fabricar pisos metálicos, paneles, estantes de almacenamiento, viga de encuadre, o cualquier otra aplicación similar. Este código contiene el cálculo de esfuerzos admisibles, detalles de las uniones soldadas, precalificación de WPSs, calificación de procedimientos de soldadura y soldadores, inspección de las soldaduras y soldadura por espárragos (2, 105).

* **Código de soldadura estructural-Acero de Refuerzo “AWS D1.4/D1.4M: 2011, *Structural Welding Code-Reinforcing Steel*”:** Este código se aplica a la soldadura de acero de refuerzo, y para soldar acero de refuerzo con estructuras de acero al carbono o de baja aleación. El código cubre la soldadura de acero de refuerzo en la mayoría de las aplicaciones de hormigón armado, bajo los procesos de soldadura SMAW, GMAW y FCAW. Este código

se debe en unión con los requisitos generales del código de construcción y es aplicable a toda la soldadura del acero de refuerzo y se realiza como parte de la construcción de hormigón armado. Las uniones soldadas en este código no aplican cuando se requiera tenacidad (prueba de impacto) en la especificación general, ya que estas uniones no se incluyen en este código. Este código incluye esfuerzos admisibles, detalles estructurales, requerimientos de mano de obra, técnica, inspección, calificación de procedimientos de soldadura y soldadores, además se ilustran consideraciones importantes como los perfiles de soldadura inaceptables, tamaños de soldadura, detalle de las uniones de anclaje, placa base, y rellenos (2, 106).



^a La Convexidad, “C” de una soldadura o de una superficie de cordón con dimensión W no debe exceder el valor de la siguiente tabla.

Ancho de cara de soldadura (W)	CONVEXIDAD MÁXIMA, C
$W \leq 5/16$ in	1/16 in
$W > 5/16$ in hasta $W < 1$ in	1/8 in
$W \geq 1$ in	3/16 in

Figura 12.1. Perfiles de soldadura en filete aceptables y no aceptables según Part B de la AWS (2, 86)

* **Código de soldadura para puentes “AASHTO/AWS D1.5M/D1.5:2015 *Bridge Welding Code*”**: Este código contiene los requisitos de soldadura en aceros al carbono y de baja aleación para la fabricación de puentes y debe ser usado conjuntamente con la especificaciones estándar para el diseño de puentes de carretera AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*). Este código no es aplicable para soldaduras con metal base de espesores menores a 3 mm y que su resistencia mínima a la fluencia no sea mayor a 100 KSI (690 MPa), tampoco se puede utilizar para construir recipientes y tuberías a presión o estructuras compuestas de tubos estructurales. Este código cubre lo referente a inspección, calificación, detalles estructurales, soldadura con espárragos, detalles de las juntas soldadas, requerimientos de mano de obra y otros. Las secciones de que consta este documento se listan a continuación: (2, 107)

* **Parte 1.** Provisiones generales.

* **Parte 2.** Diseño de conexiones soldadas.

* **Parte 3.** Mano de obra.

* **Parte 4.** Técnicas.

* **Parte 5.** Calificación.

* **Parte 6.** Inspección.

* **Parte 7.** Soldadura de pernos.

* **Parte 8.** Estructuras estáticamente cargadas.

* **Parte 9.** Puentes de acero soldados.

* **Parte 10.** Estructuras tubulares.

* **Parte 11.** Reforzamiento y reparación de estructuras existentes.

* **Parte 12.** Plan de control de fractura para miembros no redundantes.

* **Anexos.** Contiene anexos normativos y anexos informativos.

* **Código de soldadura estructural–Acero inoxidable “AWS D1.6/D1.6M: 2007, *Structural Welding Code–Stainless Steel*”**: Este código contiene los requisitos de soldadura para estructuras de acero inoxidable sometidas a esfuerzos de tensión (Excluyendo recipientes y tuberías a presión) por medio de los procesos SMAW, GMAW, GTAW, FCAW, SAW y SW. Este código se empleará conjuntamente con cualquier otro

código complementario o especificación de diseño o construcción. Este código además contiene WPS precalificados para aceros inoxidable austeníticos, además abarca el diseño, fabricación, inspección y procedimientos de calificación de soldadura y soldadores. El metal base puede ser acero inoxidable austenítico, ferrítico, martensítico, dúplex y endurecibles por precipitación (2, 108).

*** Código de soldadura-lámina metálica “AWS D9.1M/D9.1:2012, *Sheet Metal Welding Code*”:** Este código contiene los requisitos de soldadura por arco y soldadura fuerte (*Brazing*) para la fabricación y montaje de componentes no estructurales con lámina metálicas comúnmente disponibles, con espesores hasta 6,4 mm. Este código se puede aplicar en sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado, equipos de procesamiento de alimentos, elementos arquitectónicos en lámina de metal y otras aplicaciones no estructurales. Este código no aplica cuando la presión negativa o positiva excede 30 kPa (5 PSI). Además, contiene los requerimientos y limitaciones para la calificación de procedimientos, requerimientos de mano de obra e inspección. Los anexos encontrados en este código no son obligatorios, pero proporcionan información útil sobre los materiales y procesos (2, 109).

12.2.2. *American Society of Mechanical Engineers (ASME)*

La sociedad americana de ingenieros mecánicos (ASME), ha publicado numerosos documentos de soldadura como códigos, normas y especificaciones entre otros, los cuales cubren los usos y el control de calidad de materiales, productos, operaciones y procesos de soldadura. Existen dos comités que involucran la formulación, revisión e interpretación de los códigos ASME, para los productos que pueden ser fabricados por soldadura. El código para calderas y recipientes a presión y el código para tubería de presión. Es responsabilidad del propietario seleccionar el código que debe aplicar a una instalación. Los factores a ser considerados por el propietario son: alcances de las secciones del código, requisitos jurisdiccionales y la aplicabilidad de otros códigos y estándares. El propietario es el

responsable de la imposición de requerimientos suplementarios a los del código (si es necesario), para asegurar la instalación que se desea construir (2, 110).

* **Código ANSI/ASME para calderas y recipientes a presión (ASME BPVC):** El alcance y campo de aplicación de este código es muy amplio y es necesario tener presente el campo específico de cada una de las secciones, subsecciones y partes de que consta este código, además, este es el único código que requiere de que las inspecciones sean llevadas a cabo por terceras partes independientes de los fabricantes y los usuarios. El código establece que antes de construir calderas o recipientes a presión, es necesario que la compañía posea el permiso correspondiente; y para obtener tales permisos, se debe implantar un sistema de control de calidad y un manual que lo describa. Es importante entender que cada categoría tiene sus requisitos de materiales únicos para cada tipo de construcción. Dentro de cada uno de los códigos son factores adicionales que deben tenerse en cuenta el diseño, fabricación, pruebas, inspección y progreso de la instalación. El código ASME para calderas y recipientes a presión consta de las siguientes secciones: (2, 111)

Sección I: Reglas para la construcción de calderas de potencia.

Sección II: Especificaciones de materiales.

Parte A- Materiales ferrosos.

Parte B- Materiales no ferrosos.

Parte C- Especificaciones para soldadura en varillas, electrodos y material de aporte.

Parte D- propiedades de los materiales.

Sección III: Componentes para plantas nucleares.

División 1 Reglas para la construcción de componentes para plantas nucleares.

División 2. Reglas alternativas de construcción de componentes para plantas nucleares.

Sección IV: Reglas para la construcción de calderas de calefacción.

Sección V: Ensayos no destructivos

Sección VI: Reglas recomendadas para el cuidado y operación de calderas para calefacción.

Sección VII: Reglas recomendadas para el cuidado de calderas de potencia.

Sección VIII: Recipientes a presión.

División 1 Reglas para la construcción de recipientes a presión.

División 2. Reglas alternativas para la construcción de recipientes a presión.

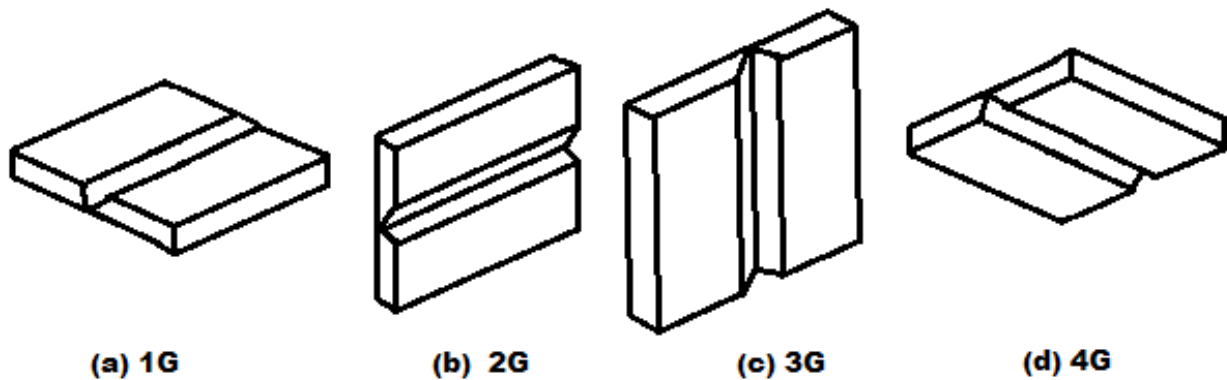
División 3. Reglas alternativas para la construcción de recipientes de alta presión.

Sección IX: Calificación de procedimientos de soldadura y soldadores. En la figura 12.2 y 12.3, se observan las posiciones para calificación de soldadores en ranura y filete sobre platina y tubería, según la sección IX del código ASME BPVC.

Sección X: Recipientes a presión de plástico reforzado con fibra.

Sección XI: Reglas para la inspección de componentes de plantas nucleares.

POSICIÓN DE SOLDEO EN PLATINA CON RANURA



POSICIÓN DE SOLDEO EN TUBERÍA CON RANURA

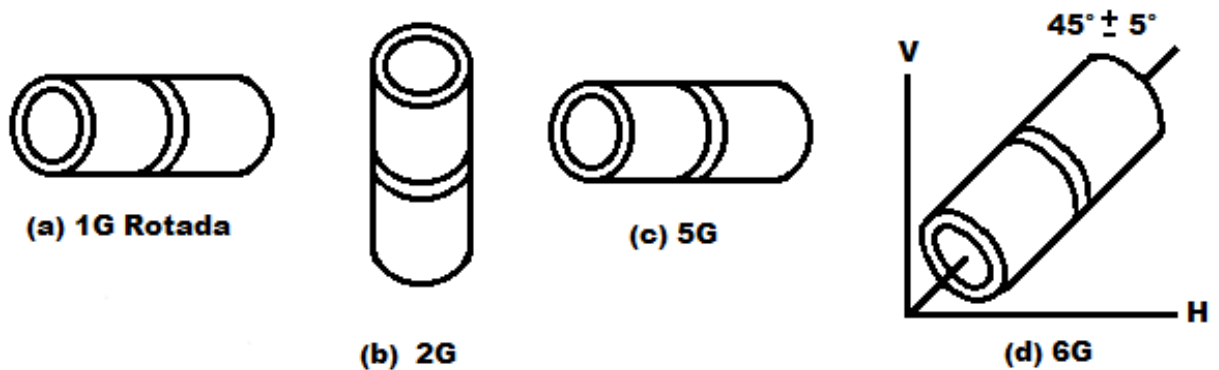
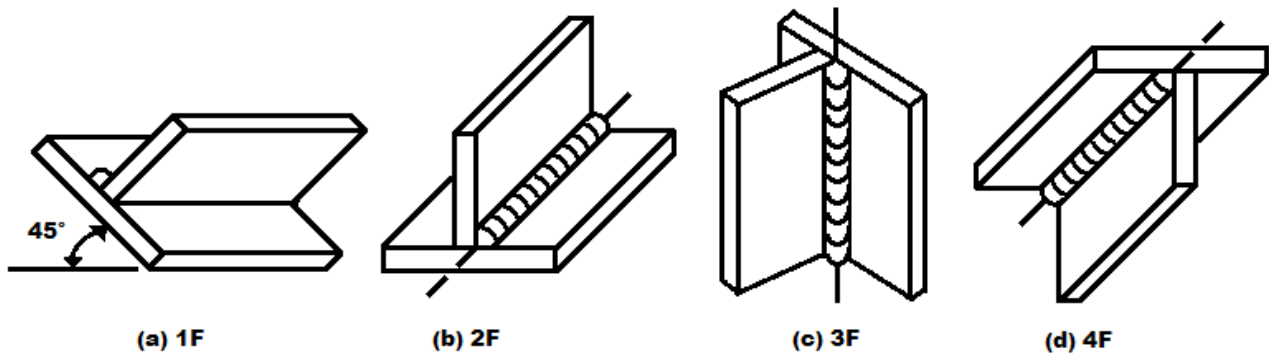


Figura 12.2. Posiciones de calificación de soldadores en ranura sobre platina y tubería, según código ASME BPVC sección IX (2, 111)

Código ASME sección IX: Se hará énfasis en la sección IX del código ANSI/ASME para calderas y recipientes a presión (ASME BPVC), ya que contiene la calificación de soldadores, operarios de soldadura, soldadores para soldadura fuerte y operarios de soldadura fuerte, y los procedimientos de soldadura que ellos emplean al soldar o al hacer soldadura fuerte de acuerdo con el código de calderas y recipientes sujetos a presión de la ASME y con el código para tubería de presión ASME B31. Este código está dividido en dos partes: la parte QW da requerimientos para soldar y la parte QB contiene requerimientos para soldadura fuerte (*Brazing*) (2, 111).

POSICIÓN DE SOLDEO EN FILETE SOBRE PLATINA



POSICIÓN DE SOLDEO EN FILETE SOBRE TUBERÍA

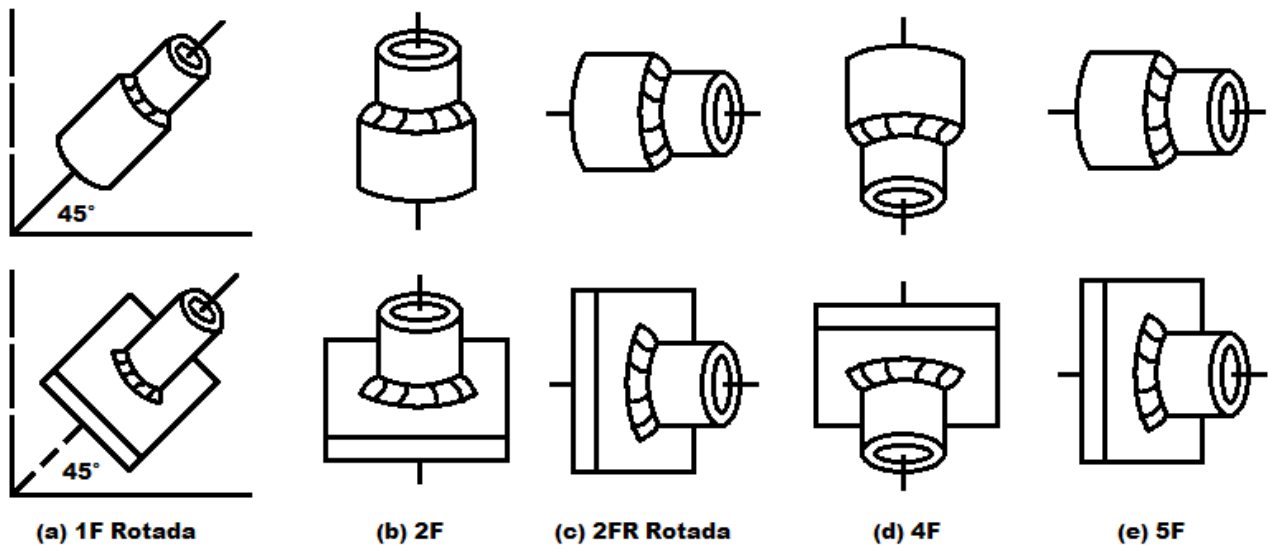


Figura 12.3. Posiciones de calificación de soldadores en filete sobre platina y tubería, según código ASME BPVC Sección IX (2, 111)

El propósito de la especificación del procedimiento de soldadura (WPS) y del registro de calificación del procedimiento (PQR) es determinar que el conjunto de partes soldadas, propuesto para construcción, sea capaz de proveer las propiedades requeridas para su aplicación predestinada. Se presupone que el soldador o el operario de soldadura que efectúa la prueba de calificación del procedimiento de soldar es un trabajador experimentado. Esto es, la prueba de calificación del procedimiento de soldar establece las propiedades del conjunto soldado, no la experiencia del soldador o del operario de soldadura (2, 111). En calificación de habilidad, el criterio básico establecido es determinar la capacidad del soldador para depositar metal de soldadura sano. El propósito de la prueba de calificación de habilidad para el operario de soldadura es determinar la capacidad física y mecánica del operador de soldadura para operar el equipo de soldar (2).

La parte QW está dividida en cuatro secciones:

QW100: Requerimientos generales de soldadura.

QW200: Calificación de procedimientos de soldadura.

QW300: Calificación de la habilidad para soldar.

QW400: Datos de soldadura (Variables de soldadura).

La parte QB está dividida en cuatro secciones:

QB100: Requerimientos generales para soldadura fuerte.

QB200: Calificación de procedimientos para soldadura fuerte.

QB300: Calificación de la habilidad para soldadura fuerte.

QB400: Datos de soldadura fuerte (Variables de soldadura fuerte).

La sección IX del código ANSI/ASME para calderas y recipientes a presión trata todos los procesos de soldadura por separado e impone restricciones para cada uno de los procedimientos de soldadura y para la calificación de soldadores, por tal motivo, se recomienda revisar el código para saber qué dice sobre el proceso de soldadura que se va a utilizar, antes de realizar cualquier prueba de soldadura. Además este código abarca una gama muy amplia de procesos de soldadura y aplicaciones de soldadura como

recubrimientos duros, soldadura de pernos, soldadura fuerte (*Brazing*) y soldadura débil (*Soldering*) (2, 111).

* **Código ANSI/ASME B31 para tuberías sujetas a presión:** Este código contiene actualmente ocho secciones, cada sección establece los requerimientos mínimos de diseño, materiales, fabricación, montaje, ensayos e inspección para cada tipo específico de sistemas de tubería. Todas las secciones de este código requieren la calificación de los procedimientos de soldadura, habilidad del soldador y operarios de soldadura, de acuerdo con el código ASME BPVC, sección IX, aunque en algunas secciones permiten que esta calificación se realice con la norma API 1104. “Soldadura para tubería e instalaciones relacionadas” o el código AWS D10.9. “Especificaciones para la calificación del procedimiento de soldadura y soldadores para tuberías”. Las secciones del código ASME B31, son: (2, 110)

1. Sección B31.1. (*Power Piping*). Tubería de potencia para la industria termoeléctrica: Esta sección establece los requisitos mínimos para el diseño, fabricación, montaje, ensayos, inspección y materiales para las tuberías de los sistemas de potencia y de servicios auxiliares para estaciones de generación de energía eléctrica, plantas industriales e institucionales, plantas térmicas de calefacción y sistemas de calefacción urbanos (2, 112).

2. Sección B31.2. Tubería para gas combustible (Natural, GLP): Esta sección establece los requisitos mínimos para el diseño, fabricación, montaje, ensayos, inspección y materiales para los sistemas de tubería de gases combustibles como el gas natural, gas licuado de petróleo (GLP), mezclas con aire arriba de los límites superiores permisibles, GLP en fase gaseosa, o mezclas de estos gases. Las especificaciones que eran objetos de esta sección actualmente están cubiertas por la sección B31.4. (2).

3. Sección B31.3. Tubería para plantas químicas y refinerías de petróleo: Esta sección establece los requisitos para el diseño, construcción, montaje, instalación, ensayos, inspección y materiales para tuberías de procesamiento o manejo de productos químicos, petróleo y sus derivados. Como ejemplo están las plantas químicas, farmacéuticas, refinerías de petróleo, plantas de procesamiento de productos químicos e hidrocarburos y plantas de entrega o mezclado. Esta sección maneja las tuberías para todo tipo de líquidos,

del cliente. También están incluidos las líneas y equipos de almacenamiento de gas del tipo tubo cerrado que son fabricadas o forjadas a partir de tubos y conexiones (2, 116).

7. Sección B31.9. Tuberías de servicios en edificios: Esta sección establece los requisitos de diseño, construcción, instalación, ensayos, materiales, inspección y control de los sistemas tuberías de servicios en edificaciones como edificios industriales, comerciales, públicos, institucionales y residenciales de unidades múltiples, que no requieren el rango de tamaños, presiones y temperaturas cubiertas en B31.1. Esta sección sólo incluye los sistemas de tubería dentro de los edificios o sus límites de propiedad (2, 117).

8. Sección B31.11. Sistemas de tubería para transporte de lodos: Esta sección establece los requisitos de diseño, construcción, instalación, ensayos, materiales, inspección, operación y mantenimiento de tuberías de transporte de pulpas acuosas de materiales no peligrosos, tales como el carbón, minerales, concentrados y otros materiales sólidos, entre la planta de procesamiento de pulpa y la planta receptora, incluyendo estaciones de bombeo y regulación. Esta sección contiene procedimientos para tuberías en servicio corroídas, así como para la toma de las acciones permanentes a fin de determinar si estas pueden continuar en operación en condiciones razonablemente seguras, si tienen que ser reparadas o se debe disminuir la presión máxima permisible de operación a fin de que puedan continuar en servicio (2, 118).

12.2.3. American Petroleum Institute (API)

El instituto americano del petróleo (API) ha liderado el desarrollo de equipos y normas de funcionamiento para la industria del petróleo y gas natural. El API mantiene más de 600 documentos que incluyen normas, manuales, especificaciones, prácticas recomendadas, boletines, directrices e informes técnicos que se distribuyen en todo el mundo. Las normas API están diseñados para ayudar a los profesionales de la industria a mejorar la eficiencia y rentabilidad de sus operaciones, cumplir con los requisitos legales y reglamentarios, salvaguardar la salud y proteger el medio ambiente. Los códigos relacionados con soldadura más relevantes del API son: (2)

*** Norma API 1104 Soldadura para tubería e instalaciones relacionadas:** Esta norma cubre las soldaduras por arco y gas de uniones a tope, filete y tapón de tuberías de acero al carbono y de baja aleación utilizadas en la compresión, bombeo y transporte de petróleo crudo, productos del petróleo, gases combustibles, dióxido de carbono, nitrógeno y, donde sea aplicable, cubre soldaduras en sistemas de distribución. Es aplicable tanto para construcciones nuevas como aquellas que se encuentran en servicio. La soldadura puede ser realizada por SMAW, SAW, GTAW, GMAW, FCAW, soldadura por plasma, soldadura oxiacetilénica o soldadura por destello o una combinación de estos procesos, usando una técnica de soldadura manual, semi automática, mecanizada, o automática, o una combinación de estas técnicas. Las soldaduras pueden ser producidas en posición o mediante rotación, o por una combinación de éstas. Esta norma también cubre los procedimientos para ensayos de radiografía, partículas magnéticas, líquidos penetrantes y ultrasonido, así como las normas de aceptación a ser aplicados a las soldaduras de producción sometidas a ensayos destructivos o inspeccionados por ensayos no destructivos como radiografía, partículas magnéticas, líquidos penetrantes, ultrasonido e inspección visual. Esta norma API consta de las siguientes secciones: (2, 119)

1. Generalidades.
 2. Publicaciones de referencia.
 3. Definición de términos.
 4. Especificaciones.
 5. Calificación de procedimientos de soldadura.
 6. Calificación de los soldadores.
 7. Diseño y preparación de juntas para soldaduras de producción.
 8. Inspección y ensayos de soldaduras de producción.
 9. Estándares de aceptabilidad para ensayos no destructivos.
 10. Reparación y remoción de defectos.
 11. Procedimiento para ensayos no destructivos.
 12. Soldadura mecánica con metal de aporte.
 13. Soldadura automática sin metal de aporte.
- Apéndice A.** Estándares alternativos de aceptación para soldadura.

Apéndice B. Soldaduras en servicio.

* **Norma API 650/653. Tanques de acero soldados para almacenamiento de crudo/ Inspección de tanques, reparación, modificación y reconstrucción:** Estas dos normas establecen los requisitos mínimos de materiales, diseño, fabricación, reparación, modificación, traslado, montaje, mantenimiento, integridad y pruebas para tanques de almacenamiento en la industria petrolera y química, que están en posición vertical, cilíndrica sobre el suelo, cerrado y con techo abierto, en varios tamaños y capacidades para presiones internas que se aproximan a la presión atmosférica (presiones internas que no excedan el peso de las placas del techo), pero una presión interna más alta está permitida cuando se cumplen requisitos adicionales. Esta norma sólo se aplica a los tanques cuya parte inferior está en su totalidad uniformemente soportada y a los tanques que no estén refrigerados en servicio y que tienen una temperatura máxima de 93 °C (200 °F) o menos. Esta norma está diseñada para ofrecer a la industria de tanques la seguridad y economía razonable para su uso en el almacenamiento de petróleo, productos derivados del petróleo y otros productos líquidos. Estas normas no presentan o establecen una serie fija de tamaños de tanque permitidos, sino que tiene por objeto permitir al comprador que seleccione cualquier tamaño de tanque que se le acomode mejor a sus necesidades (2, 120, 121).

* **Publicación PSD 2201: Procedimientos de soldadura de *Hot Taps* en equipos en servicio:** Esta publicación ofrece información para ayudar a la realización de forma segura de las operaciones en caliente, en equipos que están en servicio, en la industria del petróleo y petroquímica. Estos procedimientos de soldadura, así como la realización de ramificaciones (*Hot Taps*) en tuberías, recipientes o tanques que contienen líquidos inflamables u otros materiales, son prácticas comunes en la industria de petróleo. Esta publicación se puede usar como guía y como fuente de información para este tipo de trabajos, sin embargo, ningún documento puede abordar todas las situaciones ni responder a todas las preguntas, aunque la comprensión de los peligros potenciales y la aplicación de este documento pueden ayudar a reducir la probabilidad y gravedad de los incidentes. Los procedimientos de esta publicación sólo aplican para aceros ferríticos y austeníticos, además pueden necesitar de una revisión debido a que todos los trabajos de *hot taps* son diferentes y tienen problemas únicos que son específicos de cada instalación (2, 122).

12.2.4. Organización internacional para la normalización (ISO - Internacional Organization for Standarization)

La norma ISO 9001: 2015 no tienen los suficientes requisitos para garantizar la calidad de los procesos de soldadura, aunque la norma contiene las medidas necesarias que se deben tener en cuenta respecto al diseño y la construcción de estructuras soldadas; y la evaluación de su calidad está dada bajo la norma EN-ISO 3834: 2007 - Requisitos de calidad para la soldadura de materiales metálicos. Esta norma no reemplaza a la norma ISO 9001: 2015, pero es un complemento y es más precisa, en cuanto a los requisitos específicos de soldadura. El objetivo de la certificación EN-ISO 3834 es asegurar que los fabricantes son competentes y controlan adecuadamente el proceso de soldadura, generando soldadura de calidad, además de incrementar el nivel de eficiencia y reducir los costos de producción, sin disminuir la calidad del producto soldado (123, 124, 125).

La norma EN-ISO 3834 está estructurada de forma que puede ser aplicada a la fabricación, tanto en talleres, como en construcciones soldadas de gran envergadura. La norma está articulada en 5 partes: Parte 1, EN ISO 3834-1: Criterios para la selección del nivel adecuado de requisitos de calidad; Parte 2, EN ISO 3834-2: Requisitos de calidad completos; Parte 3, EN ISO 3834-3: Requisitos de calidad normales; Parte 4, EN ISO 3834-4: Requisitos de calidad elementales; Parte 5, EN ISO 3834-5: Documentos que deben ser observados para poder declarar la conformidad con los requisitos de calidad establecidos en las partes 2, 3 y 4 de la norma ISO 3834. La norma contiene tres niveles diferentes de requisitos de calidad, aplicables tanto a la producción en talleres, como a las obras de construcciones soldadas. La selección del nivel de calidad se basa en la necesidad de controlar el proceso productivo para garantizar el total cumplimiento de los requisitos contractuales y regulatorios. La tipología del proceso de producción es un parámetro importante para la selección de la parte correcta de la norma EN ISO 3834, según la parte 1; EN ISO 3834-1. Los siguientes criterios se debe tener en cuenta en la selección del nivel de calidad: La importancia de los productos, la complejidad de la construcción, la

diversidad de productos que se construyen, los materiales utilizados, los problemas metalúrgicos que se pueden tener y los defectos que pueden aparecer (123, 125).

En la primera parte de la norma ISO 3834, también se aplican los requisitos de ISO 9001, en cuanto a los criterios y requisitos de calidad para la soldadura de materiales metálicos. Por lo tanto, para complementar el sistema de calidad se tienen en cuenta los requisitos de ambas normas; incluidos: control de documentos y registros (párrafo 4.2.3, 4.2.4); responsabilidad de la dirección (punto 5); provisión de recursos (párrafo 6.1.); competencia, toma de conciencia y formación del personal (párrafos 6.2.2, 7.5.2 b); planificación de la realización del producto (punto 7.1); determinar los requisitos del producto (Sección 7.2.1); revisión de los requisitos del producto (Sección 7.2.2); compra (Sección 7.4); validación del proceso de producción (párrafos 7.5.2); propiedad del cliente (punto 7.5.4); auditoría interna (párrafos 8.2.2); supervisión y medición del producto (punto 8.2.4). Cuando se realiza operaciones de soldadura, es necesario establecer procedimientos escritos para la calificación del personal empleado para realizar tales tareas. El soldador obtiene permiso para realizar trabajos de soldadura cuando pase el examen de calificación o pueda extender sus calificaciones, comprobando que ha trabajado bajo WPS actuales. Cuando la calidad de la soldadura se deteriore, se puede llevar a cabo un examen de verificación a petición del inspector. La empresa fabricante de la construcción debe tener personal calificado y competente tanto para la planificación, ejecución y supervisión de la producción de soldadura. Se debe realizar un análisis de los procesos de calidad para identificar inconsistencias y lugares de formación de fallas o errores de producción para evitar su recurrencia. El control de calidad se puede llevar a cabo según los estándares EN ISO 3834: 2007 y EN ISO 14731: 2008. (123, 125). Los procedimientos de soldadura (WPS) tienen plazo ilimitado, mientras que las calificaciones de los soldadores tienen validez de dos años y pueden renovarse con base en la continuidad de las actividades del soldador y mediante ensayos no destructivos. Las principales normas europeas de referencia para la cualificación de los procedimientos de soldadura y de los soldadores, son: UNI EN- ISO 15614-1: 2017, UNI-EN 287-1: 2012, ISO 9606:2014, ISO 14732:2014, UNI-EN 1418: 1999, ISO 15618:2016 e ISO 15609:2004.

12.3. Las especificaciones técnicas

Los diferentes códigos y normas establecen documentos de soporte que contienen una detallada descripción de las partes de un conjunto; allí se ubican características específicas tales como: dimensiones, espesores, composición química, resultados de ensayos, entre otras. Estas especificaciones pueden ser de uso interno, para establecerse como parámetro de estandarización de materiales o productos empleados en los trabajos realizados por el respectivo código o norma; además, en ocasiones, establece cómo se debe realizar la inspección, pruebas y control de calidad de dichos materiales. El productor es responsable de que el material o producto cumpla con todos los requisitos obligatorios y suplementarios de la especificación correspondiente, mientras que el usuario del material o del producto, es el responsable de verificar que el producto cumple con todas las especificaciones. Por ejemplo, el código ASME BPVC, en su sección II, partes A, B y C, recopila las especificaciones de los materiales que son empleados en la construcción de calderas y recipientes a presión, en donde las especificaciones para los materiales base, las adoptó de la ASTM, y los consumibles de soldadura las adoptó de la AWS. Otro ejemplo es el código AWS D1.1, el cual hace referencia directa a las especificaciones de materiales de la ASTM y AWS. Antes de describir la forma en que las normas sobre bienes soldados prevén el control de los materiales, es conveniente examinar algunos aspectos relacionados con las especificaciones ASTM y AWS o las instituciones que las emiten (2). La AWS ha realizado numerosas especificaciones sobre usos y calidad de materiales, productos, prueba, operaciones y procesos de soldadura. Estas especificaciones cubren la mayor parte de los materiales consumibles empleados en proceso de soldadura, incluyendo requisitos obligatorios y opcionales. Los requisitos obligatorios cubren aspectos como composición química, propiedades mecánicas, fabricación, pruebas, marcado e identificación y empaque de los productos. Los requisitos opcionales en apéndices se proporcionan como fuente de información sobre la clasificación, descripción o uso previsto de los metales de aporte cubiertos. La designación alfanumérica de la AWS para materiales de aporte, consta de una letra "A" seguida de 5, un punto y uno o dos dígitos adicionales (AWS A5.1) (2, 3, 126).

13. CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTOS Y PERSONAL DE SOLDADURA

Para la ejecución de todos los proyectos de soldadura, se debe realizar la calificación de procedimientos de soldadura, soldadores y operarios de soldadura, ya que es uno de los pasos preliminares más importantes en la fabricación de componentes soldados, debido a que todos los trabajos de soldadura necesitan de uno o más procedimientos que definan con detalle, cómo se deben realizar las operaciones de soldeo y las normas que se deben aplicar. Las normas contienen los requisitos de preparación, calificación y certificación de los procedimientos de soldadura, así como la calificación de la habilidad de los soldadores y operarios de soldadura para realizar soldaduras sanas en la construcción de los componentes o estructuras. Cuando los proyectos de soldadura comienzan sin procedimientos de soldadura, calificación de soldadores y operarios de soldadura y revisión de materiales, se genera una gran cantidad de rechazos en las soldaduras, aumentando los costos de producción, debido a deficiencias en los materiales, un mal procedimiento de soldadura o en la técnica (habilidad) del soldador (2, 3). Es mucho más económico encontrar una deficiencia durante la calificación que durante la producción real. Parte del éxito de los trabajos de soldadura depende del cumplimiento y disponibilidad de los procedimientos de soldadura para cubrir todas las aplicaciones previstas, así como del personal apto para aplicarlos, además, se debe realizar una inspección completa antes, durante y después de soldar, a fin de asegurar que los procedimientos establecidos son aplicados de manera correcta por el personal debidamente calificado (2, 3, 126, 127).

La mayoría de los códigos descargan la responsabilidad de la calificación de los soldadores en el fabricante o contratista. Por esto, las calificaciones del personal de soldadura son realizadas por la compañía constructora, responsabilizándose de que los procedimientos y el personal de soldadura han sido calificados de acuerdo con los códigos, normas y especificaciones adecuados y que han sido evaluados satisfactoriamente (2, 3). Sin embargo, los fabricantes y contratistas deben saber que la calificación de procedimientos y

personal de soldadura, en realidad dará como resultado una reducción de los costos. Durante el ensayo de calificación de habilidad, puede estar involucrado el inspector de soldadura. Las estructuras de las compañías particulares dictarán el grado en que el inspector estará involucrado en este proceso. Algunos códigos requieren que el inspector de soldadura este presente durante la calificación del procedimiento de soldadura y de los soldadores, además que presencie los ensayos destructivos y no destructivos a las juntas soldadas. En consecuencia, el inspector de soldadura debe conocer los distintos pasos en la calificación de procedimientos de soldadura y personal de soldadura (1, 2, 3, 126, 128). El propósito de la especificación del procedimiento de soldadura (WPS) y del registro de calificación del procedimiento (PQR), es determinar que el conjunto de partes soldadas propuesto para construcción es capaz de proveer las propiedades mecánicas requeridas para su aplicación final. Se supone que el soldador o el operario de soldadura que efectúan la soldadura de calificación del procedimiento es un trabajador experimentado, ya que la prueba de calificación del procedimiento de soldadura establece las propiedades del conjunto soldado, no la experiencia del soldador o del operario de soldadura. Un WPS relaciona las **variables esenciales** (Variables que no se deben cambiar más allá de los límites establecidos en el código respectivo); las **variables no esenciales** (Ajustadas a los requisitos de la empresa y que no afectan la calidad de la soldadura) y los parámetros de aceptabilidad de estas variables, cuando se usa el WPS. En el WPS se proporcionan los parámetros de las variables de soldadura para los soldadores y operarios de soldadura. El PQR relaciona lo que se usó al calificar el WPS y los resultados de las pruebas destructivas. En la calificación del soldador (habilidad), el criterio básico es determinar la capacidad del soldador para depositar metal de soldadura sano. El propósito de la prueba de calificación de habilidad para el operario de soldadura, es determinar la capacidad mecánica del operador de soldadura para operar el equipo de soldar (2, 129). Además, las variables de soldadura son los parámetros y condiciones que varían en una operación de soldadura y que influyen sobre las propiedades mecánicas de las uniones soldadas. Existen diferentes designaciones para estas variables, hay códigos que las designan como variables esenciales y no esenciales; otros códigos las designan como variables de procedimiento, variables de habilidad de soldadores y operarios (2).

El inspector de soldadura puede estar involucrado en las calificaciones desde el punto de vista de la revisión de documentos. Una de las responsabilidades puede ser revisar tanto los formularios de procedimiento de soldadura como calificación de soldador, para determinar si están de acuerdo con las especificaciones del código y del trabajo. Los inspectores de soldadura, con experiencia, se dan cuenta de que numerosos problemas puntuales pueden ser detectados y corregidos, previo a la soldadura, si esa revisión se realiza cuidadosamente. Más aún, la mayor parte de los códigos dan autoridad al inspector de soldadura para requerir que los soldadores sean recalificados en caso de que continúen produciendo trabajos con calidad inferior a la establecida (3). El *brazing* (Soldadura fuerte), también requiere procedimientos y personal calificados para resultados satisfactorios y las técnicas específicas de ensayos de calificación para brazing pueden encontrarse en ASME sección IX, que describe los distintos pasos involucrados en la calificación de procedimientos y personal de soldadura (2, 3).

El fabricante, contratista, instalador o ensamblador, es el responsable de la soldadura hecha por su organización y conducirá las pruebas requeridas para calificar las especificaciones de los procedimientos de soldadura que él use en la construcción de las juntas soldadas, hechas en conformidad con el código seleccionado, y la habilidad de soldadores y operarios de soldadura se hará de acuerdo con los procedimientos que apliquen. Además, se debe resaltar que ningún trabajo de soldadura se debería iniciar sin los procedimientos de soldadura que se requieren y que estén debidamente, documentados, calificados y aprobados, también hay que resaltar que sólo debe intervenir personal de soldadura previamente calificado en la extensión y alcance, para que realice los trabajos de acuerdo a su calificación. El fabricante o contratista debe mantener un registro de todos los resultados obtenidos en los procedimientos de soldadura y en calificaciones de habilidad de soldadores y de operarios de soldadura. Estos registros serán certificados por el fabricante o contratista y estarán disponibles para el inspector (2). Los códigos, normas y especificaciones tienen requisitos particulares para la documentación y calificación de los procedimientos y personal de soldadura, ya que algunos códigos como el AWS D1.1/1.1M, aceptan el uso de especificaciones de procedimientos de soldadura precalificados (no requieren de ensayos

mecánicos de calificación antes de ser empleados); pero otras normas no contemplan esta posibilidad. Hay tres aproximaciones generales a la calificación de procedimientos, estos incluyen los procedimientos precalificados, ensayo de calificación de procedimientos, y ensayos sobre prototipos para aplicaciones especiales; los ensayos sobre prototipos pueden usarse simplemente para suplir otros métodos más estandarizados de calificación de procedimiento (2, 3).

El código AWS D1.1/1.1M enumera varios procesos de soldadura, metales base, espesores, configuraciones de junta, y técnicas de soldadura, que cuando se usan en una combinación específica, se consideran precalificadas. También reconoce como precalificados cuatro procesos de soldadura como el SMAW, SAW, FCAW y GMAW, excepto la transferencia en corto circuito. Sin embargo, esto no significa que estos sean los únicos procesos de soldadura que pueden ser usados, sólo implica que se requiere un ensayo de calificación del procedimiento, si se usan otros procesos de soldadura diferentes a los cuatro anteriores. También hay numerosos metales base que se consideran aceptables y no requieren calificación cuando se usan. El código diferencia entre edificios, puentes y estructuras tubulares, en cuanto a las aleaciones que son aceptables en cada caso. En consecuencia, el hecho que un metal base esté precalificado para la aplicación en edificio, no implica necesariamente que también sea aplicable para el uso en la construcción de puentes (2, 3, 4). En la figura 13.1, se observan cómo se obtienen las probetas de soldadura para calificación de procedimientos de soldadura en tubería, según la norma AWS D1.1. (103).

13.1. Especificación del procedimiento de soldadura (WPS)

La especificación del procedimiento de soldadura (EPS o WPS en inglés), contiene y describe las variables que se pueden controlar durante el proceso de soldadura, así como los rangos de los valores en que están calificadas estas variables y se pueden emplear en la producción o construcción de uniones soldadas. La calificación del procedimiento de soldadura se realiza para mostrar la compatibilidad del metal base, metal de aporte de soldadura, procesos y técnicas aplicadas al cordón de soldadura. Las EPS se hacen con el

propósito de dirigir a soldadores y operarios para que apliquen soldaduras de manera que se asegure el cumplimiento de los requerimientos mecánicos de los códigos, normas o especificaciones aplicables al contrato de construcción. La elaboración del WPS es responsabilidad del fabricante o constructor, el cual debe preparar por escrito (ya sea por procedimientos precalificados o calificados con pruebas mecánicas), de todas las especificaciones del procedimiento de soldadura que requiera, de manera que queden cubiertas todas las variables, operaciones y aplicaciones del proyecto, cumpliendo con los requisitos específicos del código, norma o especificación que se esté aplicando; además, debe estar calificada y aprobada por parte del ingeniero de soldadura, o por el inspector de soldadura o el representante del propietario (2).

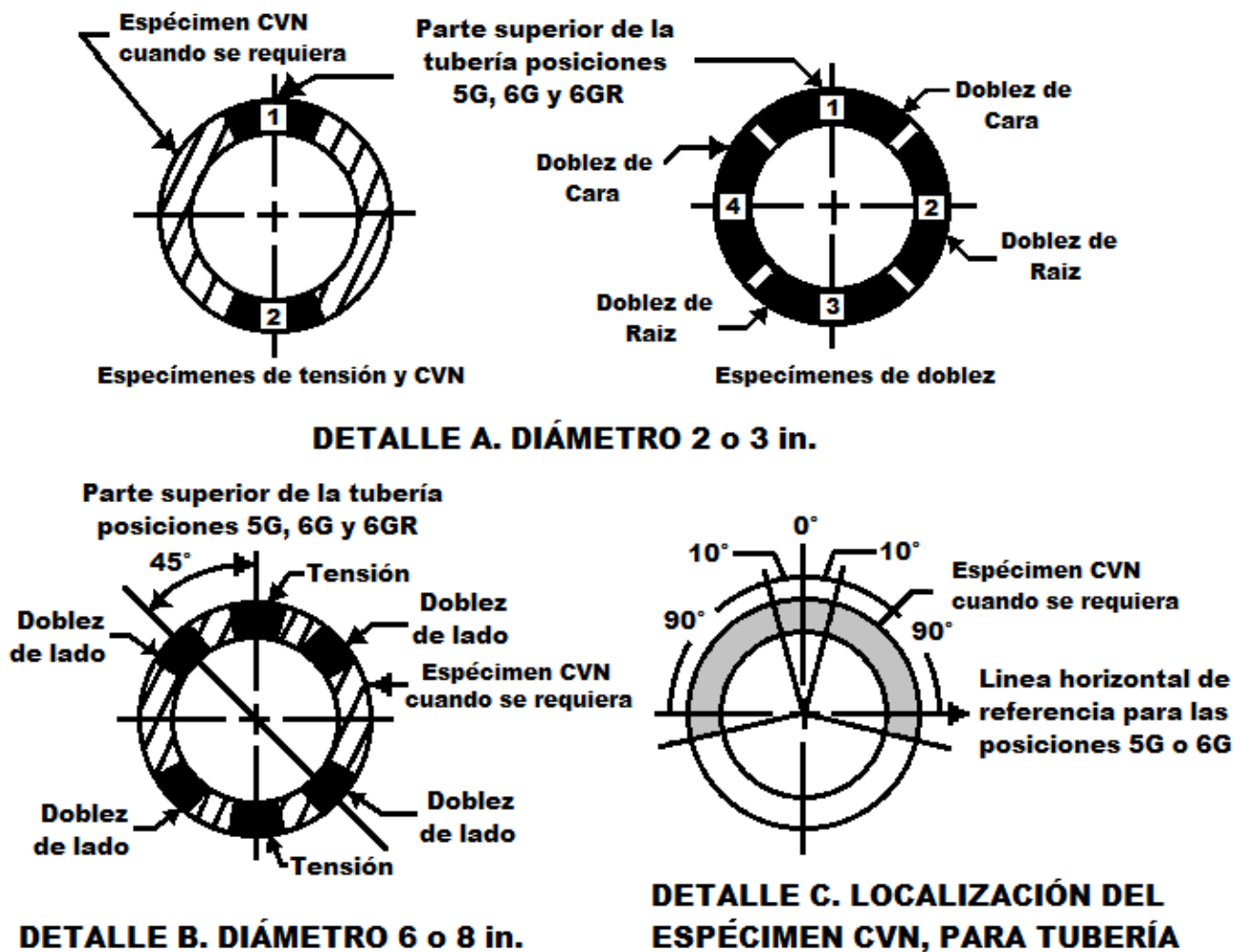


Figura 13.1. Lugar donde se obtienen las probetas de soldadura para calificación de procedimientos de soldadura en tubería según la norma AWS D1.1. (2, 103)

Las EPS deben estar disponibles para el personal de soldadura, para que sepan cómo deben realizar los trabajos de soldadura, además, son una guía para la revisión e inspección de las soldaduras por parte de los inspectores de soldadura, de las segundas o terceras partes involucradas, que estén realizando la auditoria interna o externa. El inspector de soldadura puede verificar los requerimientos del procedimiento y compararlos con los parámetros reales que está usando el soldador para la producción, además, el monitoreo del proceso de soldadura es conveniente para detectar cualquier deficiencia en el procedimiento de soldadura que puede aparecer sólo durante la soldadura de producción (2).

Desde el punto de vista de las variables, existen diferencias significativas entre una norma y otra: mientras que el código ASME BPVC estipula qué es una EPS, el cual debe contener todas las variables esenciales, variables esenciales suplementarias y cualquier otra información adicional útil para la unión soldada; el código AWS D1.1 y la norma API 1104, únicamente establecen que deben especificarse las variables esenciales. Adicionalmente, sólo en el código ASME BPVC se hacen consideraciones relacionadas con variables esenciales y variables esenciales suplementarias, definiendo con claridad cada tipo de variable mencionada. El código ASME BPVC, sección IX considera que una variable esencial del procedimiento de soldadura es aquella cuyo cambio puede afectar las propiedades mecánicas de la junta soldada y requiere la recalificación del procedimiento de soldadura. Un cambio en una variable esencial suplementaria puede afectar la tenacidad (resistencia al impacto) de la junta soldada. Las variables no esenciales del procedimiento de soldadura son aquellas que cuando se realiza un cambio en una condición de soldadura no afecta las propiedades mecánicas de la unión y no requiere recalificación. Por lo anterior, se pueden hacer cambios en las variables no esenciales en el WPS para adaptarse a requerimientos de producción, sin recalificación, siempre y cuando tales cambios se documenten con respecto a las variables esenciales y no esenciales para cada proceso. Esto se puede hacer por enmienda del WPS o mediante el uso de un nuevo WPS (2).

Los cambios en variables esenciales o en variables esenciales suplementarias (cuando se necesite) requieren recalificación de la WPS (PQRs nuevos o adicionales para apoyar el

cambio en variables esenciales o en variables esenciales suplementarias). Las principales variables que deben contener y se deben revisar en un WPS son el proceso de soldadura; metal base y especificaciones aplicables; materiales de aporte, tipo, clasificación, composición; características eléctricas (polaridad y tipo de corriente); diseño de la junta y tolerancias; preparación y limpieza de la junta; técnica de aplicación del cordón de soldadura; secuencia de la soldadura; posiciones de soldar; gases de protección; gases de combustión; temperaturas de precalentamiento y entre pases; limpieza y martilleo, calor aportado; respaldo; tratamiento térmico posterior a la soldadura. La relación de variables de soldadura anterior no es completa, ni detallada y no todas las variables o categorías aplican a todos los procesos; por tal razón, los inspectores de soldadura o personal encargado de evaluar y aprobar los WPS, deben consultar los códigos y normas que están aplicando, ya que estas detallan con exactitud los requisitos aplicables en cada situación (2, 129, 130).

13.1.1. Especificación del procedimiento de soldadura precalificado

Varios códigos AWS permiten el empleo de especificaciones del procedimiento de soldadura precalificado. La precalificación de las especificaciones del procedimiento de soldadura, se puede definir como la exención del PQR o de las pruebas mecánicas de calificación requeridas para la aprobación del WPS, esto es, que dicho WPS puede emplearse para realizar soldaduras de construcción sin necesidad de efectuar dichas pruebas mecánicas. En cualquier caso, todo WPS precalificado debe estar escrito y el personal que aplique la soldadura debe estar calificado de acuerdo al código que se esté aplicando. Para que un WPS pueda considerarse como precalificado, debe cumplir con todos los requisitos establecidos en la sección de juntas precalificadas del código que se esté aplicando. Algunos de los requisitos son: el empleo exclusivo de procesos considerados como precalificados; el empleo exclusivo de los metales base y de aporte incluidos en las juntas precalificadas; la aplicación de las temperaturas mínimas de precalentamiento y entre pases indicada en la tabla de procedimientos precalificados; que los parámetros de intensidad de corriente (amperaje) o velocidad de alimentación de alambre, potencial (voltaje), velocidad de desplazamiento y flujo de gas de protección estén establecidos en el WPS dentro de la

limitación de variables prescrita en la tabla para juntas precalificadas, para cada proceso aplicable, y deben cumplirse todos los requisitos indicados en la tabla de juntas precalificadas (2).

13.2. Calificación de la habilidad del personal de soldadura (WPQ)

El WPQ (*Welder Performance Qualification*) determina la habilidad de los soldadores y operarios de soldadura, para producir soldaduras sanas de acuerdo con procedimientos de soldadura calificados. Los códigos y normas establecen que el personal de soldadura debe estar debidamente calificado antes de iniciar cualquier unión para el proceso de producción o construcción, esta calificación debe tener clara la extensión y los términos de la calificación, ya sea que se trate de procedimientos calificados, precalificados o estándar. El personal de soldadura es clasificado como sigue: soldador (*welder*), si emplea métodos de aplicación manuales o semiautomáticos, operario de soldadura (*welding operator*), si aplica métodos mecanizados o automáticos y punteador (*tack welder*), si únicamente aplica puntos de soldadura (*tack welds*). Esta última clasificación es considerada únicamente por las normas emitidas por la AWS. La calificación es responsabilidad legal del constructor o fabricante, y la responsabilidad del inspector de soldadura es verificar que cada soldador u operario de soldadura esté trabajando bajo el WPS en el que ha sido calificado. La realización de una prueba de calificación de habilidad del personal de soldadura estará limitada por el WPS y servirá como base para fijar los límites de las variables dentro de los cuales queda calificada la habilidad del soldador u operario de soldadura. Los detalles de los ensambles o cupones de prueba, el tipo y número de ensayos a realizar y los criterios de aceptación están definidos en cada código o norma particular y difieren entre una y otra. En el caso de calificación de soldador, estas pueden incluir posición de soldadura, configuración de la junta, tipo y tamaño de electrodo, espesor del metal base, y técnica específica de soldadura. Todas estas características están relacionadas con los aspectos de la operación de soldadura, afectados directamente por la habilidad física del soldador. Los códigos, en general, son específicos para las limitaciones de las variables esenciales (2, 3, 4). En la figura 13.2, se observa un formato de calificación de soldadores WPQ.


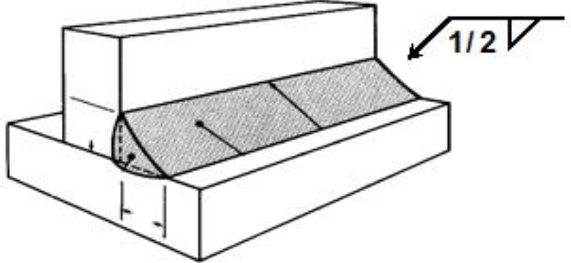
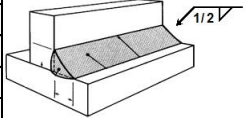
		Ing. JOSÉ LUDDEY MARULANDA ARÉVALO INSPECTOR DE SOLDADURA CERTIFICADO CWI-AWS AMERICAN WELDING SOCIETY			HOJA: 1 De: 2		
JUNTA PRECALIFICADA <input type="checkbox"/> PRUEBA DE CALIFICACIÓN <input checked="" type="checkbox"/> RECORD DE CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO (PQR) <input type="checkbox"/>							
EMPRESA	PROWELD S.A.S			Nombre	JEISSON GALLO QUINTERO		
PROCESO DE SOLDADURA	SMAW			Identificación	1,098,664,296	Fecha 27/12/2012	
No de soporte del PQR	101	ESTAMPE: JG 101		Autorizado por	EMPRESA		
POSICIÓN				CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS			
Posición	2F			Proceso	SMAW		
Tipo unión	Ranura <input type="checkbox"/>	Filete <input checked="" type="checkbox"/>		Tipo corriente	CC+	Voltaje OCV 40V	
Progresión	Asc. <input type="checkbox"/>	Desc <input type="checkbox"/>		Velocidad	4 - 7 cm/min	Otro	
DISEÑO DE JUNTA USADA							
Tipo <input type="checkbox"/>	simple <input checked="" type="checkbox"/>	doble <input type="checkbox"/>					
Respaldo <input type="checkbox"/>	Material						
Apertura de Raíz <input type="checkbox"/>	Ángulo de bisel <input type="checkbox"/>						
MATERIAL BASE							
Especificación	ASTM A-36						
Fabricante	BOHLER	Origen					
Espesor	1/4"	Tipo o grado	I				
MATERIAL DE APORTE				TÉCNICA			
AWS especificación	E7018	Espesor	1/8 in	Pase simple			
AWS Clasificación	A 5.1			Pases múltiples (cada lado)	X		
Fabricante	West Arco	Origen		Número de electrodos	2 por pase		
Protección	NA	Composición	NA	Ángulo de avance			
Diametro de tobera		Caudal	NA	Limpieza interpases	CEPILLO O GRATA		
Pre calentamiento	NA	Tiempo	NA	Pre calentamiento	NA	Tiempo NA	
Reacondicionamiento	NA			Post calentamiento	NA	Tiempo NA	
PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA							
Pase o Capas de Soldadura	Material de aporte		Corriente		Volts	Progresión	Detalle de la junta
	Clase	Diam.	Tipo y Polaridad	Amp			
1		0,125 in	DC-EP			Avance	
2		0,125 in	DC-EP			Avance	
3		0,125 in	DC-EP			Avance	
INSPECCIÓN VISUAL				ACEPTADA	Supervisor:	JOSÉ LUDDEY MARULANDA	

Figura 13.2. Esquema del formato de calificación de soldadores WPQ (2)

13.3. Calificación del procedimiento de soldadura (PQR)

El PQR (*Procedure Qualification Record*), es un registro de los datos de las variables esenciales y variables esenciales suplementarias de soldadura que fueron usados para soldar un cupón de prueba (piezas a soldar durante la prueba de calificación). Las variables no esenciales y otras variables usadas durante la soldadura del cupón de prueba pueden ser registradas a opción del fabricante o del contratista. Las variables registradas en el PQR deben estar dentro de las variables establecidas en la especificación del procedimiento de soldadura (preliminar), y estas son una pequeña parte de las variables reales que se usarán en soldadura de producción. Todas las variables que se registran en el PQR, serán variables reales usadas durante la soldadura del cupón de prueba. Si las variables no son reguladas durante la soldadura, no serán registradas. Para calificar el PQR este debe contener los resultados de las pruebas mecánicas de los especímenes probados, ya que el propósito del PQR es demostrar que los materiales y métodos prescritos en el WPS producen soldaduras con propiedades mecánicas de acuerdo con las especificaciones de cada código (2).

Cuando los cupones cumplen los criterios de aceptación de los ensayos de resistencia a la tensión, ductilidad (doblado) y “sanidad” (*nick break – para la norma API 1104*), comprobándose que la unión soldada obtenida con el WPS preliminar, tiene las propiedades mecánicas requeridas para la aplicación y es satisfactoria, se deben documentar los resultados de estos ensayos y los valores reales de las variables empleadas para unión del ensamble soldado en el PQR (*procedure qualification record*), para el cual, cada norma incluye sus formatos recomendados. Una vez que las pruebas se realizaron y sus resultados son satisfactorios según los criterios de aceptación establecidos, se procede a hacer los cambios aplicables en el WPS preliminar, de acuerdo con los valores reales de las variables empleadas en las pruebas de calificación del procedimiento, y se emiten el WPS y PQR definitivos. El WPS calificado debe proporcionarse a los soldadores u operarios de soldadura que lo van a emplear, además, debe estar disponible para la revisión de los representantes del cliente y para las actividades aplicables del inspector de soldadura (2). En la figura 13.3, se observa un formato del registro de calificación de soldadores PQR.

HOJA 2 DE 2						
RECORD DE PROCEDIMIENTO DE CALIFICACIÓN PQR						
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS						
JEISSON GALLO						
ENSAYO DE TRACCIÓN						
probeta No.	Ancho	Espesor	Área	Carga aplicada lbs	Resistencia última psi	Carácter de la falla y localización
NA						
ENSAYO DE DOBLEZ DE CARA						
Probeta No.	Resultado			Observaciones		
DC-A	SIN INDICACIONES			CUMPLE		
ENSAYO DE DOBLEZ DE RAÍZ						
Probeta No.	Resultado			Observaciones		
DR-A	SIN INDICACIONES			CUMPLE		
ENSAYO DE ROTURA NICK (SANIDAD)						
Probeta No.	Resultado			Observaciones		
NA						
PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS (PND)						
Probeta No.	PND:	Resultado			Observaciones	
NA						
VALIDEZ DE LA CALIFICACIÓN						
Será por tres años, salvo los siguientes casos: 1. pasados seis meses sin aplicar el proceso para el cual fue calificado. 2. Cuando la realización de las aplicaciones sugieran duda por parte del inspector interno.						
Procedimiento No.	WPS-PROWELD- 101	Empresa contratante		PROWELD S.A.S.		
Fecha	Diciembre 27 de 2016					
Vallet Card. No.	CWI-09082811	AWS. Inspector:		Ing. JOSE LUDDEY MARULANDA AREVALO		

Figura 13.3. Esquema del formato de calificación de soldadores PQR (2)

El PQR será certificado por el fabricante o el contratista y no podrá subcontratar la función de certificación. Esta certificación es la verificación por parte del fabricante o contratista, de que la información dentro del PQR es un registro verdadero de las variables que fueron usadas durante la soldadura del cupón de prueba y que los resultados de las pruebas de tensión, dobléz, o macro ataque (cuando sea requerido), están en cumplimiento al código de construcción. No se permiten cambios al PQR, ya que es un registro de lo que sucedió durante una prueba de soldadura. Las únicas correcciones que se permiten son de redacción o de agregados al PQR. Un ejemplo de corrección de redacción es un número P, un número F, o un número A incorrecto que fue asignado a un metal base o a un metal de aporte particular. Un ejemplo de un agregado sería una modificación que se deba a un cambio de código. Por ejemplo, la Sección IX puede asignar un nuevo número F a un metal de aporte o adoptar un nuevo metal de aporte con un número F establecido. Esto se puede permitir, dependiendo de los requerimientos particulares de construcción del código, ya que el fabricante o contratista puede usar otros metales de aporte que caen dentro de ese número F particular, debido a que antes de la revisión de código, el fabricante o contratista estaba limitado a la clasificación particular del electrodo que se usó durante la calificación. Se puede incorporar información adicional dentro de un PQR en una fecha posterior siempre y cuando la información sea confirmada como parte de la condición de calificación original por registro de laboratorio o datos similares. Todos los cambios a un PQR requieren recertificación (con inclusión de la fecha) por el fabricante o el contratista (2, 129).

En general, para calificar la habilidad de soldadores y operarios de soldadura, se requiere la inspección visual, probetas de dobléz de raíz y dobléz de cara, o de dobléz lateral, pruebas de tensión y de rotura (*nick break*). En ocasiones se pueden sustituir los ensayos mecánicos por examen radiológico de los cupones soldados de prueba. Para cada prueba aprobada debe generarse un registro de calificación de la habilidad del soldador (*Welder Qualification Record-WQR*). En este documento se registran las condiciones y los valores reales de las variables que usó el soldador u operario de soldadura al soldar su cupón de prueba de calificación, así como el intervalo (límites) de las variables en las que queda calificado. También se deben registrar los resultados de la inspección visual del cupón y de

los ensayos mecánicos o exámenes radiográficos. Adicionalmente, el fabricante o contratista debe certificar que las soldaduras de pruebas fueron preparadas, realizadas y ensayadas de acuerdo con los requisitos del código o norma aplicable. (2) En la figura 13.4, se observa cómo se deben obtener los cupones o especímenes, para calificar la habilidad del soldador según la norma API 1104.

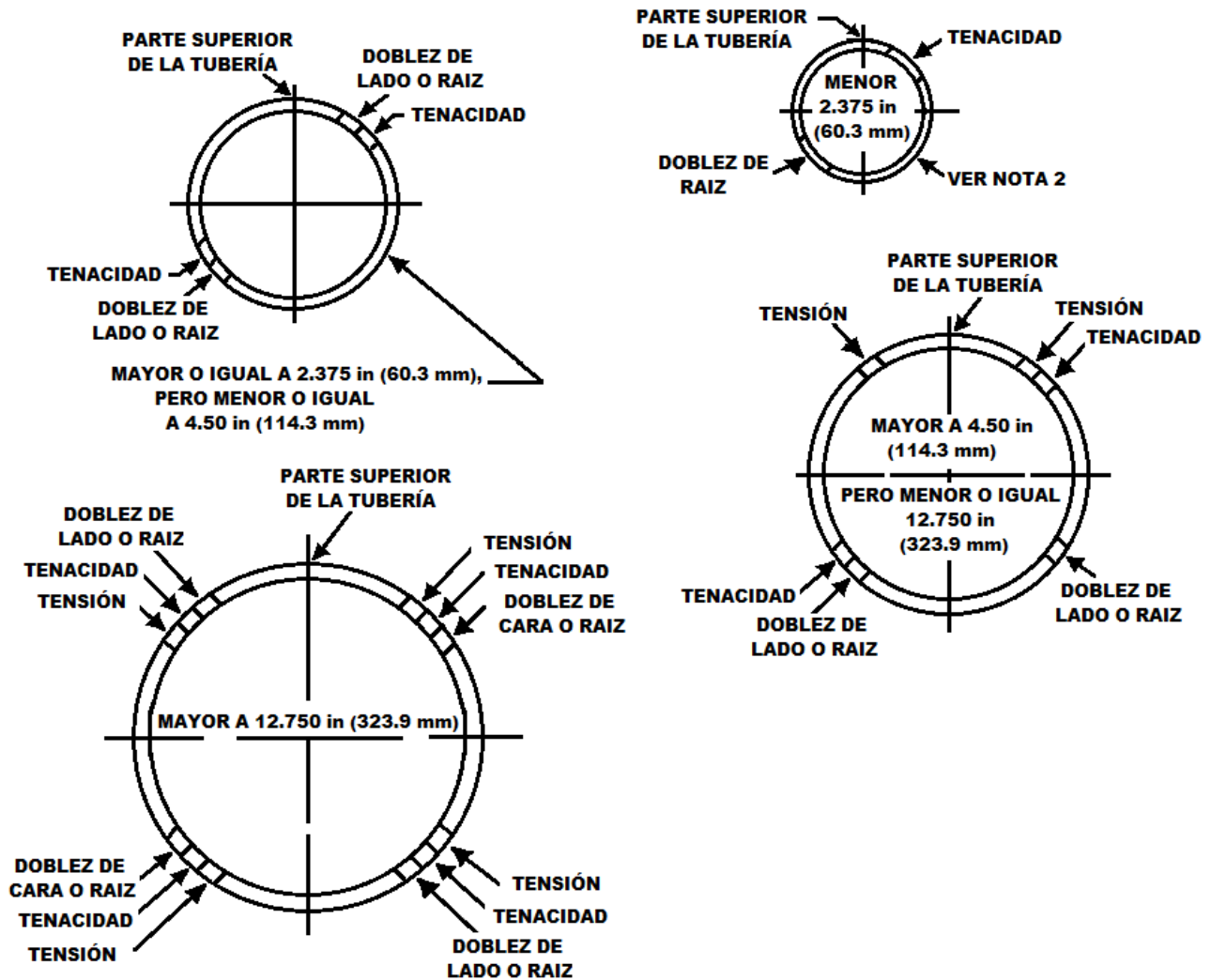


Figura 13.4. Localización de las probetas para calificar soldadores según API 1104 (122)

El WPQ aumenta la probabilidad de obtener soldaduras sanas en la fabricación de productos soldados, ya que el soldador ha demostrado ser capaz de producir soldaduras sanas, lo anterior no exime al fabricante de realizar pruebas no destructivas durante y después de las soldaduras durante la construcción. Los factores que más influyen en la aplicación de la soldadura son proceso de soldadura, posición de soldeo, forma de la pieza

(lámina, tubería o filete), tipo de material base y de aporte, espesor del metal base, diámetro de la tubería, características eléctricas, gases de combustión o protección, precalentamiento, temperatura entre pases, soldadura con o sin respaldo y la progresión cuando se suelda en posición vertical. Para simular las dificultades de la soldadura de producción, el soldador suelda en la posición o posiciones que desea ser calificado. En algunas ocasiones se le colocan restricciones de espacio durante la prueba de calificación para medir la habilidad del soldador para producir soldaduras sanas en situaciones de acceso limitado o restringido. Para la aprobación del WPQ todos los códigos y normas requieren que la soldadura de las probetas esté sana y que la fusión con el metal base sea completo. En la tabla 13.1 están las posiciones de soldadura para las cuales un soldador queda calificado de acuerdo al tipo y límites de posición, según la parte B del libro de evaluación de especificaciones de la AWS (2, 86).

13.3.1. Recalificación de la habilidad del personal de soldadura

La recalificación del soldador u operario de soldadura se debe realizar cuando falle la calificación inicial, cuando no cumple con una variable esencial del WPS, cuando el soldador permanezca más tiempo del permitido por el código sin soldar o cuando haya razones específicas para cuestionar la capacidad del personal para hacer soldaduras satisfactorias. En la sección IX del código ASME se establece que la calificación de la habilidad del soldador u operario de soldadura vence cada 6 meses, si este no ha soldado de acuerdo al WPS con el que fue calificado o después de tres años. Los códigos establecen con detalle las condiciones, excepciones y requisitos que se deben aplicar para cada caso de recalificación, y también indican cómo y en qué circunstancias debe conducirse la repetición de pruebas de habilidad, en aquellos casos donde el personal falló en su primera prueba de calificación. Adicionalmente, el personal de soldadura debe ser recalificado cuando hay cambios en una o más de las variables esenciales de habilidad (WPQ) (2).

Tabla 13.1. Calificación de soldador - Tipo y límites de posición (2, 86)

PRUEBA DE CALIFICACIÓN		Tipo de soldadura y posición de soldadura calificada			
		PLACA		TUBERÍA	
Soldadura	Posiciones	Ranura	Filete	Ranura	Filete
PLACA - RANURA	1G	F	F, H	F ^a	F, H
	2G	F, H	F, H	F, H ^a	F, H
	3G	F, H, V	F, H, V	F, H, V ^a	F, H
	4G	F, OH	F, H, OH		F
	3G y 4G	Todas	Todas		F, H
PLACA - FILETE ^b	1F		F		F
	2F		F, H		F, H
	3F		F, H, V		F, H, V
	4F		F, H, OH		F, H, OH
	3F y 4F		Todas		Todas
TUBERÍA - RANURA	1G	F	F, H	F	F
	2G	F, H	F, H	F, H	F, H
	5G	F, V, OH	F, V, OH	F, V, OH	F, V, OH
	6G	Nota ^c	Nota ^c	Nota ^c	Nota ^c
	2G y 5G	Nota ^c	Nota ^c	Nota ^c	Nota ^c
	6GR	Todas	Todas	Todas	Todas
TUBERÍA - FILETE	1F		F		F
	2F		F, H		F, H
	2F Rotado		F, H		F, H
	4F		F, H, OH		F, H, OH
	4F y 5F		Todas		Todas

^a Soldadores calificados para soldaduras de tubería mayores a 24 in (600 mm) en diámetro con respaldo o remoción del respaldo, para la posición de prueba indicada.

^b No aplicable para soldaduras de filete entre partes que tienen un ángulo diedro (ψ) de 60° grados o menos.

^c Calificado para todas las soldaduras excepto para soldaduras de ranura en conexiones T - Y- y K.

El inspector de soldadura debe asegurar que los procedimientos estén debidamente preparados por escrito; que las calificaciones de procedimientos y de habilidad de soldadores hayan sido debidamente realizadas, documentadas, certificadas y que estén actualizadas. Una vez que se inician los trabajos de producción o construcción, el inspector debe verificar que los procedimientos establecidos y calificados se apliquen correctamente en cada junta soldada, y que en su aplicación sólo intervenga personal, cuya habilidad esté calificada para cada situación (2, 96,131). En la tabla 13.2, están los requerimientos de prueba para la calificación del soldador y los rangos para los cuales el soldador queda calificado, según la parte B del libro de evaluación de especificaciones de la AWS (2).

Tabla 13.2. Requerimientos de prueba para calificación de soldador (2, 86)

PRUEBA SOBRE PLACA												
Tipo de soldadura	Espesor de placa (in)	Inspección visual	Número de especímenes			Prueba de metalografía	Espesor calificado (in)					
			Prueba de dobléz		Junta T Fracturada							
			Cara	Raíz				Lado				
Ranura	3/8	Si	1	1			3/4 máx. ^a					
Ranura	3/8 T 1	Si			2		1/8 -2T ^a					
Ranura	1 o mas	Si			2		Sin límite					
Filete 1	1/2	Si				1	1	Sin límite				
Filete 2	3/8	Si		2				Sin límite				
PRUEBAS SOBRE TUBERÍA												
Tipo de soldadura	Diámetro de tubo como soldado		Insp. visual	Número de especímenes						Diámetro calificado	Espesor de pared calificado (in)	
	Diam.	Espesor nominal		Todas las posiciones menos 5G y 6G			Solamente posiciones 5G y 6G				Min	Máx. ^a
				Cara	Raíz	Lado	Cara	Raíz	Lado			
Ranura	2 in o 3 in	Ced. 80 Ced. 40	Si	1	1		2	2		4 o menor	1/8	3/4 ^a
Ranura	6 in o 8 in	Ced 120 Ced. 80	Si			2			4	4 o mayor	3/16	Sin límite

^a También califica para soldaduras de filete sobre material de espesor sin límites.

14. INSPECCIÓN DE SOLDADURAS

La calidad del proceso de soldadura tiene un impacto significativo en la seguridad y confiabilidad de la construcción durante su servicio; en donde la calidad del producto se ve afectado por varios factores, por lo tanto, se presta especial atención en la supervisión y control de los procesos de soldadura. Todo lo anterior hace necesario la aplicación de una serie de estándares que definen los requisitos de calidad en los procesos de producción, incluida la soldadura. Las normas se han convertido en la base de la implementación de los sistemas de calidad para la industria (ISO, AWS, ASME, API entre otros). Los actos normativos se han determinado según la clasificación creada para las estructuras soldadas y la gama de pruebas a las que están sometidas, dependiendo de la clase asignada. La división de los requisitos de diseño y calidad se basa en el tipo de carga, que estará sujeta la construcción y los riesgos asociados con las posibles fallas, que amenacen la vida humana y las pérdidas materiales (123, 125).

El propósito de la inspección de soldadura es determinar que las uniones soldadas cumplen con los criterios de aceptación de un código, norma o algún otro documento. Es muy frecuente encontrar que el inspector de soldadura se vea involucrado en situaciones en las que no están establecidos los requisitos que deben cumplir las juntas soldadas de los trabajos a inspeccionar, o que tales requisitos son ambiguos o incompletos. La falta de requisitos completamente definidos puede ocurrir de varias formas: no especificar claramente las normas aplicables a los trabajos a inspeccionar, contratos que establecen, además de las normas, exclusiones de uno o más requisitos; el establecimiento de requisitos adicionales que en ocasiones no están especificados en los dibujos de fabricación; no se establecen los tipos, alcances y frecuencias de las inspecciones y pruebas a aplicar. En cualquiera de los casos, es de suma importancia que todos los requisitos a cumplir y los criterios de aceptación estén completamente definidos. En algunos casos se especifica que la inspección se realiza en un cien por ciento de la producción, y en otros, que esta se lleve a cabo por medio de muestreo, es decir, a través de la inspección y de pruebas de muestras

representativas de la producción, y por medio de estas, llegar a conclusiones válidas sobre la cantidad del lote muestreado. Las técnicas de muestreo a emplear, el tamaño de las muestras y los métodos de inspección debieran formar parte de los procedimientos formales de inspección, y también ser consistentes con los requisitos del código, norma y/o contrato (2, 96, 129, 132). De acuerdo con las directrices de PN-EN ISO 15614, definió los procesos de soldadura como procesos especiales, que requieren procedimientos documentados, los cuales definen la manera de soldar, monitorear y supervisar la ejecución de los procesos de soldadura; además de tener el equipo apropiado para realizar la soldadura, con aprobación formal del proceso de soldadura, el equipo debe tener un manejo adecuado por parte de los soldadores calificados, que aseguren las correcciones que puedan ocurrir durante el proceso (123; 133). La inspección visual es el elemento básico para la evaluación de estructuras o componentes soldados que están siendo construidos. Los códigos y normas exigen como mínimo la realización de la inspección visual para establecer la aceptación o el rechazo de una soldadura, esta inspección visual se complementa con otros métodos de ensayo destructivos o no destructivos que están especificados en los códigos y normas, los cuales van a reforzar o suplir la inspección visual. Una inspección visual bien realizada descubrirá la gran mayoría de los defectos que puedan ser encontrados usando otro método de ensayo no destructivo, los cuales son más costosos (3). La principal limitación del método de inspección visual es que solamente revela discontinuidades superficiales, siendo muy importante para el inspector de soldadura observar las superficies iniciales e intermedias de la junta soldada (2, 3). La inspección visual reduce los costos de manera muy efectiva. Esta reducción de costos se agranda cuando la inspección visual revela un defecto tan pronto ocurre, de manera que pueda ser corregido inmediatamente, lo cual disminuye el tiempo de reparación, logrando disminuir el impacto en el cronograma de la obra. Aunque la inspección visual es un método de evaluación relativamente simple, no puede ser realizado por cualquier persona, ya que para realizar inspección visual se debe tener conocimiento en numerosas áreas de la soldadura y esto requiere de muchos años de experiencia y entrenamiento en adquirir estas habilidades de inspección de soldadura (3). En la inspección visual se puede hacer una lista de chequeo de inspección para poder cubrir todas

las etapas de construcción del producto y asegurar que cada tarea específica fue realizada, lo cual ayuda al inspector a organizar el esfuerzo de inspección (2).

Un aspecto importante de la fabricación es la identificación y la trazabilidad de los materiales utilizados, siendo esta parte muy requerida en la construcción de recipientes a presión y trabajo en obras nucleares, por tal motivo, se les puede solicitar a los inspectores que colaboren con el programa de control de material como una parte de sus obligaciones regulares. Los materiales usados en la fabricación de uniones soldadas frecuentemente se ordenan de acuerdo con un código, norma o especificación. Para demostrar este cumplimiento, el proveedor debe proporcionar la documentación que describe las características más importantes del material. Estos documentos frecuentemente son informes certificados que hace el fabricante, tabulando las propiedades químicas y físicas para el material, indicando que cumple con alguna especificación. El sistema de control de material debe ser tan simple como sea posible. Si un sistema es muy complejo, puede que no sea seguido, dando como resultado una pérdida de control. Los sistemas simples que son entendidos por todo el personal de soldadura tienen más posibilidades de dar resultados satisfactorios. Otra característica importante es realizar verificaciones y auditorías para asegurar que el sistema no tenga interrupciones, dando lugar a la pérdida de la trazabilidad. El inspector puede estar involucrado en la revisión y marcado o una simple verificación para asegurar que la identificación se encuentra presente en los materiales a ser soldados.

14.1. Inspección visual de soldadura

Según la AWS, las actividades de inspección no se limitan a la aceptación o rechazo de juntas soldadas, sino que cubre sistemáticamente cada una de las etapas de fabricación o construcción, ya que la única manera en que la inspección visual pueda considerarse efectiva, para evaluar la calidad de las soldaduras, es cuando sea aplicada en cada etapa del proceso de fabricación; en donde la principal razón, para realizar la inspección en forma continua, es descubrir los problemas tan pronto aparecen, para que puedan ser corregidos de una manera más eficiente. Cuando la inspección no se realiza en las etapas iniciales del

trabajo, es difícil o imposible determinar la calidad de las juntas soldadas. Las tareas de inspección del inspector de soldadura que debe realizar en la construcción, se puede dividir en tres etapas bien definidas: antes, durante y después de la soldadura. Las actividades que deben llevarse a cabo en estas etapas se indican a continuación y debe tomarse como una guía (2, 3). En la figura 14.1, se observa un esquema de problemas con soldaduras debido a una deficiente planeación en la secuencia de construcción en montajes soldados (2).

LOS ELECTRODOS DEBEN TENER UNA INCLINACIÓN DE 45° CUANDO SE HACEN SOLDADURAS EN FILETES

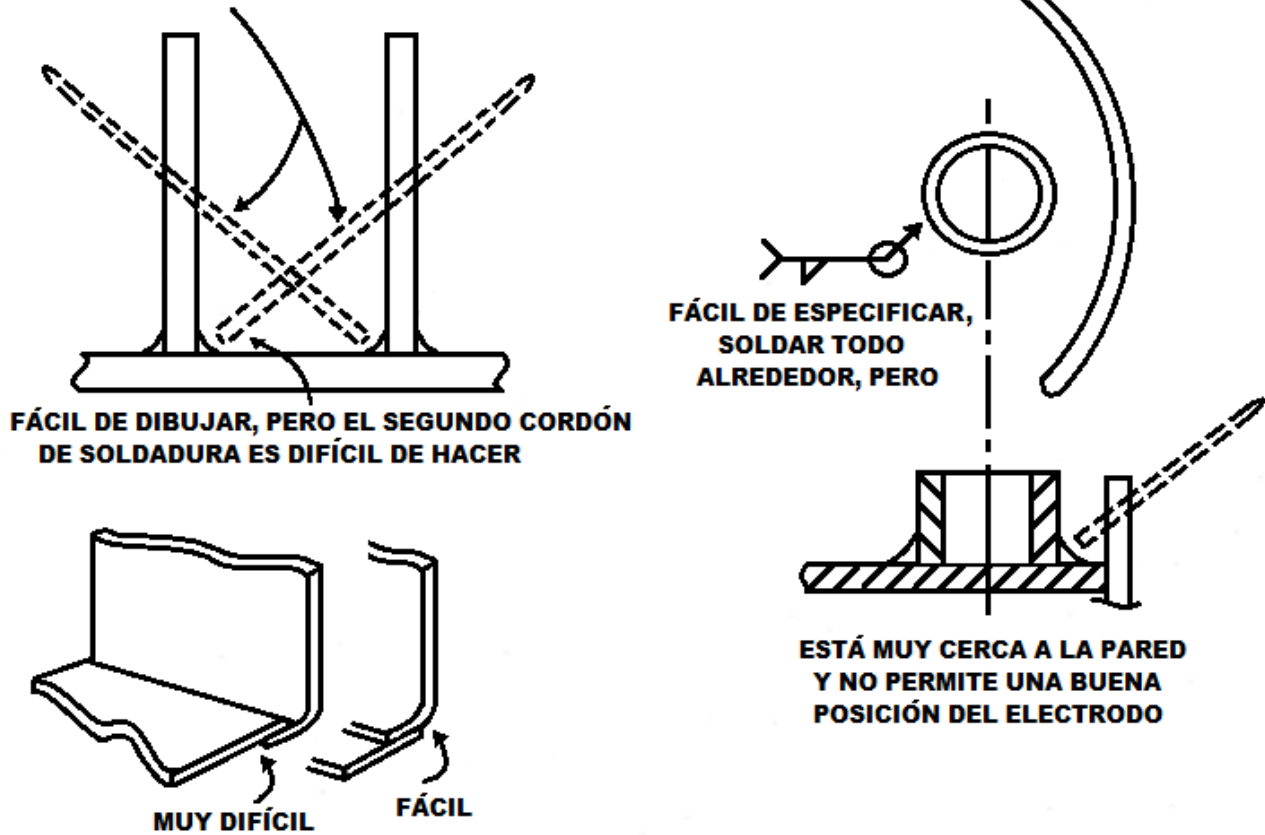


Figura 14.1. Esquema con problemas de aplicación del cordón de soldadura (2, 3, 8)

14.1.1. Inspección antes de la soldadura

- Revisar la documentación aplicable (dibujos, normas y contratos).
- Verificar o realizar las calificaciones de los (WPS), especificaciones de procedimiento de soldadura necesarias para asegurar que el personal de soldadura está disponible y calificado.

- Establecer los puntos de espera.
- Desarrollar el plan de inspección, estableciendo los puntos de verificación en los que debe realizarse la prueba no destructiva (PND) antes de que continúe la fabricación.
- Desarrollar el sistema de registros de inspección y mantenimiento de estos registros.
- Desarrollar el sistema de identificación de rechazos.
- Verificar la calidad y el estado de los metales base y materiales de aporte, constatando que cumplen con las especificaciones, que están identificados, que no presentan defectos y que son almacenados y manejados de manera que evite que se deterioren.
- Verificar el estado de los equipos de soldadura y su adecuación para aplicar cordones de soldadura de acuerdo a los WPS.
- Verificar los preparativos de la junta de soldadura (ángulo del bisel, talón, cortes de sección), para asegurar que el ajuste y la alineación de los miembros de la junta son los requeridos por el diseño de construcción.
- Verificar la presentación, limpieza y precalentamiento de la junta a soldar cuando se requiera.

14.1.2. Inspección durante la soldadura

- Verificar que las operaciones de soldadura se estén realizando de acuerdo con el procedimiento de soldadura (tipo y tamaño de electrodos; voltaje, amperaje, tipo de corriente, polaridad; velocidad de avance; tipo y flujo de gases de protección, entre otros).
- Verificar el ángulo del bisel, la apertura de raíz, alineamiento de la junta y el respaldo cuando sea necesario.
- Verificar la calidad de cada pasada de soldadura, en especial el pase de raíz, ya que este es una parte crítica de las soldaduras.
- Verificar la temperatura de precalentamiento y entre pases, para constatar que están de acuerdo con las especificadas por el procedimiento de soldadura.
- Verificar la limpieza inicial y entre pases de soldadura.
- Inspeccionar visualmente las capas o pases subsecuentes.

- Verificar y asegurar que los materiales de soldadura se manejan y almacenan apropiadamente.
- Verificar la secuencia y ubicación de los pases de soldadura individuales.
- Cuando se requiera verificar la realización y los resultados de los ensayos no destructivos durante el proceso.

14.1.3. Inspección después de la soldadura

- Inspeccionar la apariencia final de las soldaduras terminadas.
- Verificar el tamaño y la longitud de las soldaduras.
- Verificar la precisión dimensional del componente soldado y la cantidad de distorsión.
- Cuando se requiera verificar el tratamiento térmico post-soldadura.
- Cuando se requiera verificar los ensayos no destructivos y sus resultados, para compararlos con los códigos o normas de construcción.
- Verificar las actividades de reparación y re-inspección.
- Preparar, recopilar, distribuir y archivar toda la documentación de fabricación (reportes, certificados y registros) e inspección requerida.

Generalmente, las responsabilidades del inspector de soldadura, previas al comienzo de la soldadura son las más importantes, ya que cuando se realiza de forma adecuada en este trabajo de inspección, se disminuyen los problemas durante el proceso de fabricación. La mayor parte de este trabajo lo tiene que desarrollar la organización que va a realizar la inspección, determinando cuándo se hacen las inspecciones y cuál será el sistema para reportar y mantener la información de la inspección (2, 3). Las principales discontinuidades que se detectan durante la inspección visual son: socavados, grietas abiertas a la superficie, faltas de llenado, traslapes, tamaños de gargantas diferentes a los especificados, convexidades y alturas de refuerzo excesivo, distorsiones, porosidad superficial y falta de alineación. Una de las características más importante de la inspección visual es la posibilidad de eliminar las discontinuidades antes de terminar los trabajos y solucionar los problemas de aplicación de soldadura. Una vez que los pasos de la inspección hayan sido completados, deben crearse informes para explicar todos los aspectos de las evaluaciones

que fueron realizadas. Estos informes deben especificar todos los aspectos de la inspección como: cuándo se hizo la inspección, quién realizó la inspección, el criterio de aceptación aplicado y los resultados de la inspección. Como se mencionó antes, estos informes deben ser lo más simples y legibles como sea posible, mientras que provean la información necesaria para que otros puedan entender lo que fue hecho y que se encontró. En la inspección visual están incluidos todos los elementos básicos de cualquier programa de control de calidad, el cual es un método eficaz de encontrar la mayoría de las discontinuidades que resultan de la soldadura; aunque, esta inspección está limitada al descubrimiento de irregularidades superficiales. Por esto, debe ser realizada en todas las etapas del proceso de fabricación para proveer una cobertura adecuada (2, 3).

14.2. Procedimientos de inspección de soldaduras

Las inspecciones de soldadura deben realizarse bajo procedimientos escritos que definan los parámetros técnicos de inspección, requisitos de equipos y accesorios, para dar cumplimiento a los requerimientos de los códigos, normas o especificaciones aplicables y de esta forma dar los criterios de aceptación y rechazo aplicables. Los procedimientos de inspección aseguran que las técnicas se desarrollen siguiendo un mismo patrón, para asegurar la repetitividad de los resultados, obteniendo un nivel alto y constante de calidad en los trabajos inspeccionados (2). Los procedimientos de inspección deben ser realizados por personal certificado que tenga entrenamiento y experiencia en el método de inspección que desea aplicar, además, debe estar familiarizado con los códigos, normas y especificaciones en los cuales está basado el procedimiento. Los procedimientos de inspección deben ser revisados y autorizados antes de ser usados por un inspector Nivel III, para el caso de métodos no destructivos como líquidos penetrantes (PT), partículas magnéticas (MT), ultrasonido (UT) y radiografía (RT); para la inspección visual de soldaduras se requiere que sea aprobada por un inspector de soldadura CWI. Después de elaborados los procedimientos de inspección, se entregan al cliente para que los revise y apruebe, y en caso de que el cliente solicite requisitos adicionales a los establecidos en los documentos aplicados, estos deben ser evaluados en común acuerdo para evitar

discrepancias en el desarrollo de la inspección. Todos los cambios deben ser acordados y establecidos en el nuevo procedimiento. Los procedimientos de inspección deben contener una breve descripción del objetivo del procedimiento, definiendo las limitaciones y dónde aplica. Se debe indicar cuáles son las normas en las que se basó la elaboración del procedimiento, las cuales servirán de consulta cuando existan dudas. Se debe definir las responsabilidades del personal involucrado en la ejecución del procedimiento y los niveles de certificación que se requieren para realizar dichos trabajos, además, se deben definir los equipos utilizados y su capacidad. Se debe hacer una descripción de todas las actividades que realizarán, con un lenguaje sencillo y preciso, para que lo pueda entender fácilmente el usuario final y por último, debe incluir el criterio de aceptación o rechazo. Se debe registrar y/o documentar la ejecución del procedimiento asignándole un número de formato, formato que debe contener los datos del ensayo y los resultados de manera que garantice una fácil interpretación (2, 132).

14.3. Herramientas para la inspección visual de soldaduras

Durante la inspección visual de soldaduras se emplean algunos instrumentos sencillos para evaluar el tamaño de las discontinuidades de soldadura, estos instrumentos son: galgas de medición, galgas de soldadura, iluminación artificial, flexómetro, lupa, calibrador, indicadores de temperatura, cámaras fotográficas o de video, fibroscópios, boroscópios, entre otros. Todos los métodos de inspección visual requieren el uso de la vista para evaluar las características presentes en la soldadura, por tal motivo, el inspector de soldadura deberá tener una agudeza visual suficiente para realizar una correcta inspección, por esto debe tener una buena visión, sea natural o corregida. Además, el inspector de soldadura deberá tener suficiente conocimiento y habilidad para realizar la inspección visual exitosamente (2).

Galgas para soldadura de filete: Las galgas para soldaduras de filete sirven para determinar el tamaño de la soldadura de acuerdo con el perfil que tenga, ya sea cóncavo, convexo o plano. El tamaño de la soldadura en filete es el mayor triángulo isósceles inscrito

en la sección transversal del cordón de soldadura, por esto es necesario medir el tamaño de las piernas o catetos del triángulo, para determinar el tamaño de la soldadura (3). El inspector de soldadura debe estar familiarizado con el uso de este tipo de galgas. Estas mediciones se hacen de manera práctica con galgas para soldadura de filete cóncavas o para soldaduras de filete convexas y planas (2). En la figura 14.2, se observa el uso de estas galgas para medir el tamaño de las soldaduras en filete.



Figura 14.2. Uso de galgas para medir el tamaño de la soldadura en filete (2)

Calibrador de soldaduras “Bridge Cam”: Con este instrumento se pueden medir diferentes características de la soldadura como la altura del refuerzo, desalineamiento, socavado, tamaños de la soldadura de filete y ángulo de preparación de bisel entre otros. Este instrumento de medición es ampliamente usado para cubrir estas y otras necesidades de inspección (2).

14.4. Reporte de inspección de soldaduras

El reporte de inspección debe ser claro y conciso, para que todas las personas relacionadas con la soldadura puedan entenderlo cuando sea necesario. Los reportes deben estar completos, con todos los datos requeridos y exactos, además deben estar firmados por el personal que realizó la inspección y deben contener los datos requeridos por el código o norma que se esté aplicando. Estos reportes deben realizarse en tinta y libre de borrones y

manchas; los errores se deben señalar y hacer una sola línea sobre el error, después hacer la corrección encima del error y se ponen las iniciales del inspector, para constatar de este cambio, se firma el reporte corregido con la fecha de corrección del error. De esta forma se garantiza quién hizo los cambios y cuándo ocurrieron, además, el inspector de soldadura puede incluir como referencia cualquier otro reporte que use en la inspección. Los reportes más comunes son los reportes de vigilancia, reportes de pruebas de materiales, reportes de calidad, reportes de progreso y registros de calificación. Por lo anterior, el inspector de soldadura hace parte integral de la organización en el departamento de control de calidad y participa directamente en el programa de aseguramiento de la calidad (2). Cuando los reportes contengan defectos en el cordón de soldadura, se debe identificar el área defectuosa de manera que pueda ser localizada y reparada apropiadamente. Un buen método es registrar y marcar directamente en la zona soldada, el tipo, tamaño y ubicación de todos los defectos, para que puedan ser localizados, identificados y reparados. Al preparar los registros deben incluirse todos los hechos, aunque sean muy básicos o bien conocidos y comprendidos al momento de escribirlos, ya que posteriormente podrían no ser recordados de manera clara (2).

Los reportes de inspección pueden ser revisados por varios inspectores, siendo algo muy positivo en la vigilancia de grandes proyectos. Un ejemplo ilustrativo es el reporte generado cuando se realiza una radiografía de una soldadura, ya que este reporte lo realizó un examinador de pruebas no destructivas Nivel II, el cual posiblemente realizó la exposición, interpretó y evaluó la radiografía y generó el reporte, después, este reporte es analizado por un inspector de soldadura, el cual dará su criterio bajo el código o norma que se esté utilizando para la construcción, luego, este reporte puede ser revisado por otro inspector de soldadura asignado por el cliente y en ocasiones el certificado final lo da el representante legal de la compañía (2). Generalmente, los reportes del inspector de soldadura no tienen una estructura o formato definido, como en el caso de los inspectores de pruebas no destructivas, cuando realizan radiografía, ultrasonido entre otras técnicas o cuando el inspector de soldadura califica a los soldadores. Esto se debe a que el inspector de soldadura está involucrado en todo el proceso de fabricación y debe generar reportes de

cada etapa, esto hace que el reporte varíe de acuerdo con la responsabilidad y la etapa que está controlando el inspector de soldadura. El reporte generado por un inspector de soldadura de una compañía pequeña será más informal que el reporte generado por un inspector de una compañía de gran tamaño, además, el inspector de soldadura debe entregar los registros y sus reportes a todas las personas que deban recibirlos y el inspector debe guardar copias de estos documentos en su propio archivo (2).

Diagnosticar a tiempo y con el ensayo preciso, puede evitar riesgos y gastos innecesarios a las industrias, en muchos casos se hace necesario la aplicación de más de un método de inspección, ya que el costo de dejar soldaduras, piezas y/o equipos sin inspeccionar puede ser incalculable, en donde se pueden generar daños irreversibles, a las estructuras a la que pertenece, a la economía de la empresa y/o al medio ambiente, entre otros. Por otro lado, los costos de las inspecciones no están estandarizados, éstos varían de acuerdo con la técnica que se emplee, el tipo de equipos que requiera para la inspección, el lugar donde se realicen, y a factores asociados a las dimensiones, volúmenes y geometrías de las piezas objeto de estudio (2, 134).

15. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES USADOS EN SOLDADURAS

Las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los materiales determinan su aplicabilidad en el diseño y funcionamiento de un producto y por tal motivo es necesario validar los valores reales. Durante el diseño de uniones soldadas es muy importante el comportamiento de los materiales bajo condiciones de carga, de manera que se pueda diseñar una estructura usando materiales y teniendo en cuenta las características deseadas. Las propiedades de los materiales son determinadas en laboratorios, bajo pruebas estandarizadas por normas internacionales. Las propiedades mecánicas de los materiales son aquellas que revelan el comportamiento de los materiales bajo una fuerza aplicada, siendo medidas sus propiedades, mediante los ensayos mecánicos; estas propiedades son: resistencia a la tensión, dureza, módulo de elasticidad, resistencia a la compresión, resistencia al corte, resistencia al impacto, resistencia a la fatiga y resistencia a la torsión. La fatiga es determinada aplicando cargas dinámicas y pulsantes, mientras que el impacto se determina con cargas a altas velocidades; los demás ensayos se realizan con cargas que pueden ser consideradas estáticas y constantes. Las propiedades físicas describen la naturaleza del material y son por ejemplo: la densidad, color, opacidad, conductividad eléctrica, conductividad térmica, expansión térmica, temperatura de fusión, entre otras. Es importante que el inspector de soldadura entienda cada uno de estos ensayos, ya que el inspector debe saber cuándo se aplica un ensayo y qué resultados va a proveer, además debe determinar si los resultados cumplen con la especificación. También puede ser de ayuda que el inspector de soldadura entienda los métodos usados. Los métodos de ensayo son generalmente agrupados en dos clases, destructivos y no destructivos (2).

15.1. Ensayos destructivos en soldaduras

Los ensayos destructivos son aquellos que se realizan a un material mediante el uso de herramientas o máquinas, las cuales producen una alteración irreversible de su composición

química o geometría dimensional, dejando al material o parte de él, fuera de uso para servicio, una vez que se realiza el ensayo. Estas pruebas determinan cómo se comporta el material cuando se somete a diferentes tipos de carga y en algunos casos se lleva el material hasta rotura. Para estos ensayos destructivos se usa una probeta construida con el material que se desea evaluar y que servirá para una sola prueba, ya que la probeta sufre cambios irreversibles como producto del ensayo. La probeta se adecua de acuerdo con las dimensiones dadas por la norma que rige el ensayo destructivo. Las propiedades mecánicas de los materiales para soldadura pueden ser agrupadas en cinco categorías como: la resistencia a la tracción, ductilidad, dureza, tenacidad y resistencia a la fatiga (2).

15.1.1. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción o tensión (cuyos resultados permiten construir una curva de esfuerzo-deformación), es una prueba muy importante para determinar algunas propiedades mecánicas de los materiales y para verificar las especificaciones de aceptación. El ensayo consiste en someter una probeta de forma cilíndrica o cuadrada o rectangular con dimensiones bajo normas internacionales, la cual es sometida a un aumento de fuerza continua, obteniendo una deformación de la probeta hasta causar la rotura. La carga es aplicada uniaxialmente a lo largo del eje de la probeta. El ensayo de tracción puede ser utilizado para determinar varias propiedades mecánicas de los materiales, como la resistencia a la rotura, resistencia a la fluencia, ductilidad, porcentaje de alargamiento, porcentaje de reducción de área, módulo de elasticidad, límite elástico, límite proporcional y tenacidad de materiales, que pueden servir para el control de calidad, como también para determinar las especificaciones de los materiales y para el cálculo de piezas sometidas a esfuerzos. Este ensayo se puede llevar a cabo a temperatura ambiente entre 10 °C y 35 °C, aunque se aconseja que se realice a la temperatura controlada de 21 °C (2). Los materiales usados en los cordones de soldadura generalmente soportan cargas de tracción, por tal motivo, esta es una propiedad muy importante para un diseñador. La resistencia a la tracción se puede expresar de tres formas; resistencia a la fluencia (*yield strength*), resistencia máxima a la tracción y resistencia última (*ultimate strength*) o resistencia de

rotura. La resistencia a la fluencia es donde el material deja su comportamiento elástico y pasa a un comportamiento plástico; la resistencia máxima se refiere al esfuerzo correspondiente con la máxima carga capaz de soportar el material y la resistencia de rotura es el punto exacto en que la carga causa la falla del material. La tenacidad es una medida de la capacidad del metal para absorber energía proveniente de un impacto y se puede estimar del diagrama de esfuerzo-deformación. La tenacidad puede ser estimada por el área bajo la curva esfuerzo-deformación. Por eso, un metal que tiene valores altos de tensión y deformación es considerado más tenaz que uno con valores bajos de tensión y deformación (2). El comportamiento elástico de los metales se refiere a la deformación causada por un esfuerzo que no genera una deformación permanente (deformación plástica), cuando se deja de aplicar la carga, el metal vuelve a su condición inicial. Este comportamiento elástico se observa en las bandas elástica (ligas), las cuales se estiran bajo una carga, pero vuelven a su forma original cuando se retira carga. Los materiales dentro de su región elástica responden con un estiramiento que es directamente proporcional a la carga aplicada, de manera que el comportamiento elástico es lineal. En la figura 15.1, se observa un esquema de un diagrama esfuerzo-deformación obtenido de un ensayo de tracción (2).

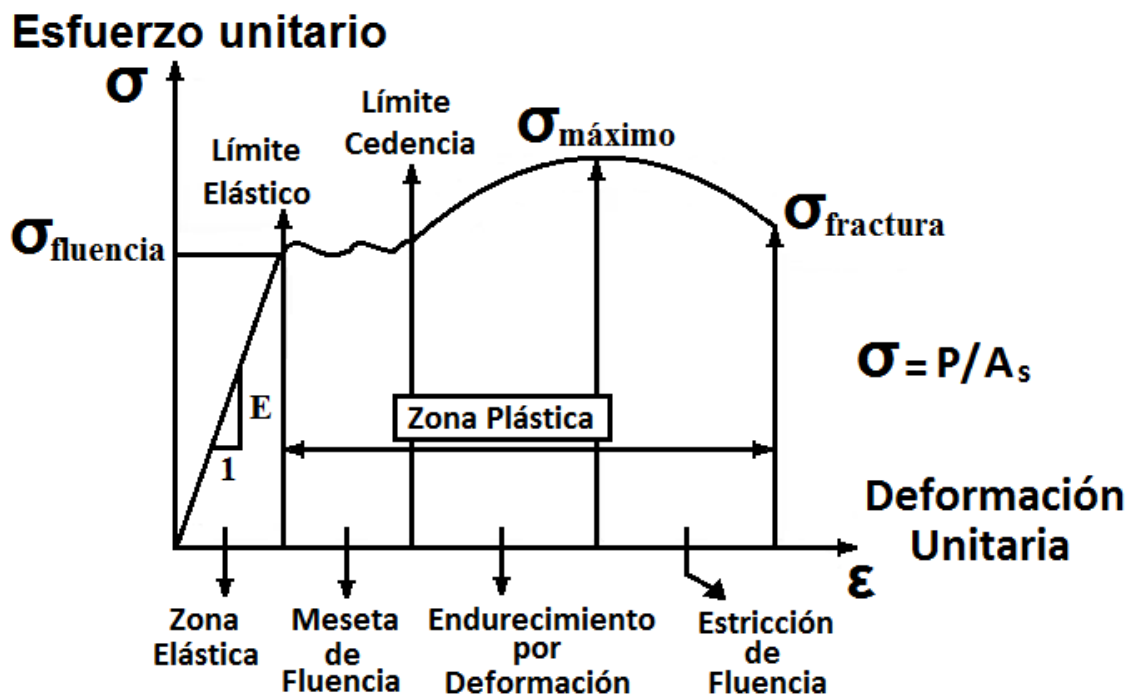


Figura 15.1. Esquema del diagrama esfuerzo-deformación típico de un ensayo de tracción

Cuando un metal es cargado por encima de su límite elástico, sufre una deformación permanente y su comportamiento se dice que es plástico, donde la relación esfuerzo-deformación no es lineal y cuando se retire la carga aplicada, el material no vuelve a su forma original. El punto donde el metal sufre un cambio de su comportamiento elástico a plástico es conocido como límite de fluencia, siendo el valor de la carga aplicada conocida como resistencia a la fluencia. Este valor es importante debido a que la mayoría de los diseñadores lo emplean como base para determinar la carga máxima admisible para las estructuras, ya que cuando un metal sufre deformación permanente, este metal puede perder confiabilidad y utilidad en algunos casos. Cuando un diseñador conoce la resistencia a la fluencia de un metal, puede determinar el tamaño necesario de la sección transversal del material para resistir una carga dada. (2)

El ensayo de tracción provee una medida directa de la resistencia del metal, ya que durante el ensayo de tensión la muestra o probeta de sección transversal conocida, es cargada de manera que puede ser determinado el esfuerzo en libras por pulgada al cuadrado (psi), en pascales (Pa) o mega pascales (MPa). Cuando se realiza un ensayo de tracción, un aspecto muy importante es la preparación superficial de la probeta de tensión, ya que pequeñas imperfecciones en la superficie, pueden resultar en reducciones significativas de la resistencia a la tensión y de la ductilidad de la probeta. En el ensayo de tracción se puede tener una curva real y otra curva ingenieril; en la curva real, para el cálculo del esfuerzo, se tiene en cuenta la reducción del área transversal de la probeta, que se deforma durante el ensayo de tracción, mientras que en la curva ingenieril no se tiene en cuenta lo anterior y el esfuerzo se calcula con el área inicial de la sección transversal de la probeta. La ductilidad es el grado de deformación que puede soportar un material sin romperse. Los valores de ductilidad pueden hallarse mediante mediciones comparativas de la longitud inicial de la probeta (l_0) entre marcas calibradas antes del ensayo y la longitud final (l_f) después del ensayo. El porcentaje de esa diferencia describe el valor de la ductilidad presente. Para calcular el esfuerzo de tensión aplicado sobre la probeta se debe considerar el área de la sección transversal sobre la cual se está ejerciendo la carga. Esta se puede representar por la siguiente fórmula: (2)

$$\sigma = P * A_s [psi] \quad (15.1)$$

σ : Esfuerzo que se ejerce sobre la probeta en (psi) o (lbs/in²).

P: Carga aplicada en (lb).

A_s : Área de la sección transversal de la probeta en (in²).

Cuando el área de la sección transversal sea circular se calcula así:

$$A_s = \frac{\pi * d_s^2}{4} [in^2] \quad (15.2)$$

π : La constante Pi (3.1416).

d_s : Diámetro de la sección transversal.

El porcentaje de elongación representa la distancia que la probeta se alarga plásticamente antes de la fractura, donde:

$$\% \text{ deformación} = \frac{L - L_o}{L_o} * 100 \quad (15.3)$$

L_o: Longitud inicial calibrada de la probeta (mm).

L: Longitud final de la probeta (mm).

El porcentaje de reducción de área (estricción) también representa la deformación plástica antes de la fractura, donde:

$$\% Ra = \frac{A_o - A_f}{A_o} * 100 \quad (15.4)$$

Ra: Porcentaje de reducción de área.

A_o: Área inicial de la probeta.

A_f: Área instantánea de la probeta.

Para pasar la prueba de tensión, el espécimen deberá tener una resistencia de tensión que no sea menor a la resistencia mínima de tensión especificada del metal base. Cuando se unen dos metales con diferentes resistencias de tensión, la prueba de tensión deberá tener una

resistencia mínima de tensión del metal más débil de los dos. Si el espécimen se rompe en el metal base, afuera de la soldadura o de la línea de fusión, la prueba será aceptada como que satisface los requerimientos, siempre y cuando la resistencia no esté más del 5 % abajo de la mínima resistencia de tensión especificada del metal base. En la figura 15.2, se observa cómo se obtienen los especímenes para la prueba de tensión, bajo la norma API 1104 (2).

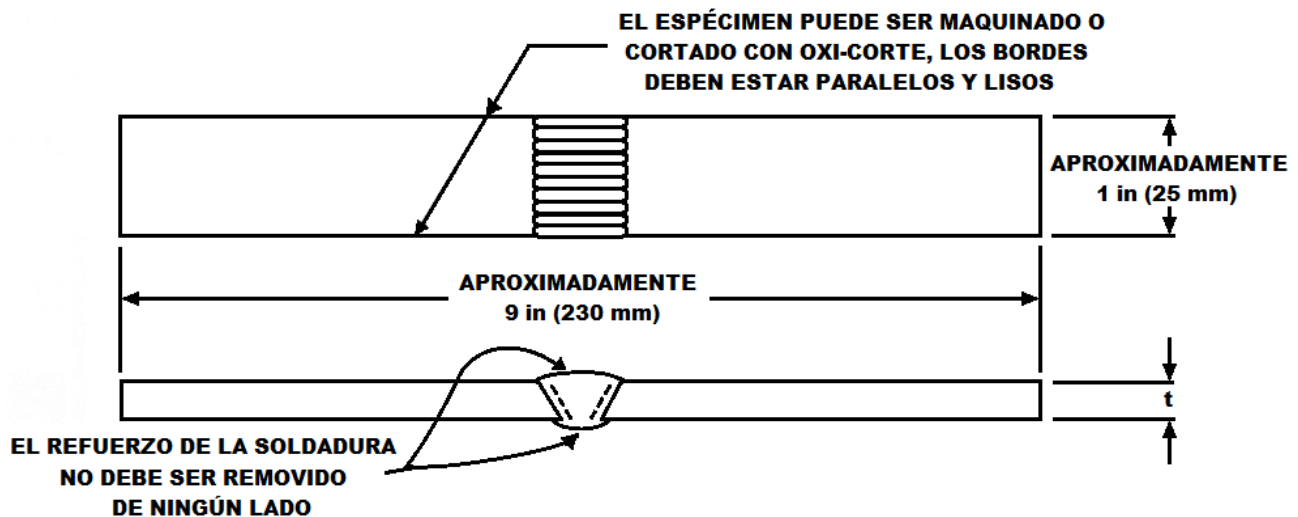


Figura 15.2. Especimen para la prueba de tensión, bajo la norma API 1104 (2, 122)

15.1.2. Ensayo de doblez guiado

El ensayo de doblez guiado se realiza para verificar la sanidad del metal de la soldadura y debe estar libre de imperfecciones. Estas pruebas son rutinarias en la calificación de procedimientos de soldadura y en la calificación de soldadores. Una vez realizada la prueba de calificación, se preparan los especímenes para la prueba de doblez guiado mediante el corte de la placa o tubería de prueba, sacando especímenes de sección recta aproximadamente rectangular. La soldadura y la zona afectada por el calor de un espécimen de doblez transversal de soldadura, debe estar completamente dentro de la porción doblada del espécimen después de la prueba. Las superficies de corte designarán los lados del espécimen. Las otras dos superficies serán llamadas las superficies de cara y de raíz, la

superficie de cara tiene el mayor ancho de soldadura. En la figura 15.3, se observa cómo se obtienen los especímenes para la prueba de doblez, bajo la norma API 1104 (2, 122).

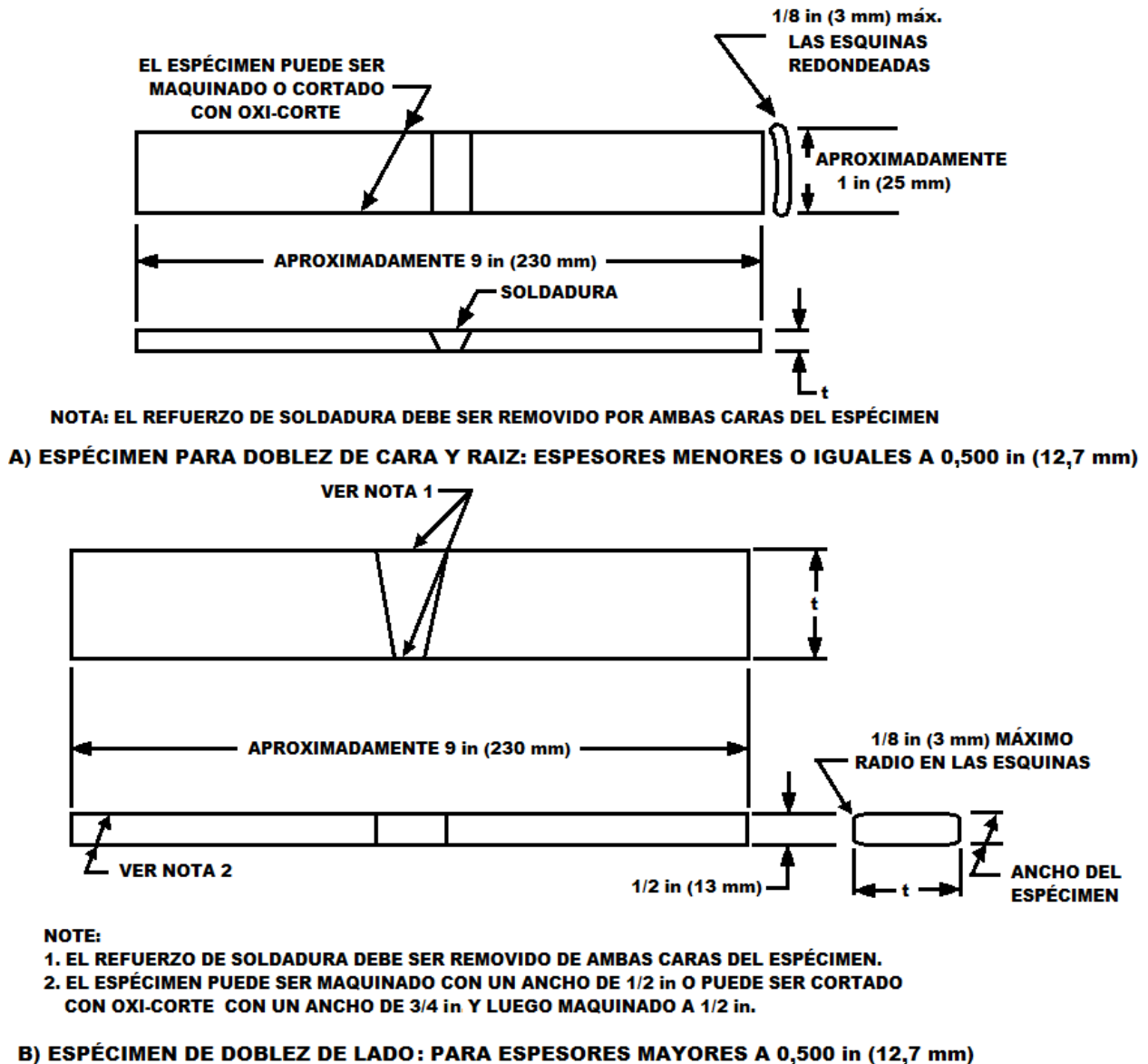


Figura 15.3. Espécimen para la prueba de doblez, bajo la norma API 1104 (2, 122)

Hay varios tipos de pruebas de doblez guiado, dependiendo de la orientación de la soldadura con respecto al doblado. Los cinco especímenes de doblez guiado dependen de si el eje de la soldadura es transversal o paralelo al eje longitudinal del espécimen, y de cual superficie (de lado, de cara, o de raíz) es el lado (exterior) convexo del espécimen de doblez. Los cinco tipos se definen como sigue: (2)

Doble transversal lateral: La soldadura es transversal al eje longitudinal del espécimen, el cual se dobla de modo que una de las superficies laterales se vuelve la superficie convexa del espécimen de doblez.

Doble transversal de cara. La soldadura es transversal al eje longitudinal del espécimen, el cual es doblado de modo que la superficie de cara se vuelve la superficie convexa del espécimen doblado.

Doble transversal de raíz: La soldadura es transversal al eje longitudinal del espécimen, el cual es doblado de modo que la superficie de raíz se vuelve la superficie convexa del espécimen doblado.

Doble longitudinal de cara: La soldadura es paralela al eje longitudinal del espécimen, el cual se dobla de modo que la superficie de la cara se vuelve la superficie convexa del espécimen de doblez.

Pruebas longitudinales de doblez: Las pruebas longitudinales de doblez se pueden usar en vez de las pruebas transversales de doblez laterales, de cara, y de raíz para probar combinaciones de metal de soldadura o de metal base que difieren marcadamente en propiedades de doblez entre los dos metales base; o el metal de soldadura y el metal base (2, 129). En la figura 15.4, se observa un esquema de la matriz de doblado según la norma API 1104.

En todas las pruebas de doblez guiado se debe examinar visualmente la superficie convexa de los especímenes de prueba, para evaluar las discontinuidades superficiales. Para aceptar la superficie, generalmente debe cumplir con los siguientes criterios: una simple discontinuidad no debe exceder 1/8 in (3,2 mm) medida en cualquier dirección; la suma de las dimensiones mayores de todas las discontinuidades excediendo 1/32 in (0,8 mm) pero menores que o iguales a 1/8 in (3,2 mm) no deben exceder 3/8 in (9,5 mm); fisuras en los bordes no deben exceder 1/4 in (6,4 mm) al menos que las fisuras resulten de inclusiones de escoria visibles u otro tipo de discontinuidades por fusión, entonces 1/8 in (3,2 mm) debe aplicar como máximo; Los especímenes con fisuras en los bordes excediendo 1/4 in (6,4 mm), sin evidencia de inclusiones de escoria u otro tipo de discontinuidades por fusión,

deben ser desechadas y debe ser ensayado un nuevo espécimen (de reemplazo) de prueba del elemento soldado originalmente (2, 86).

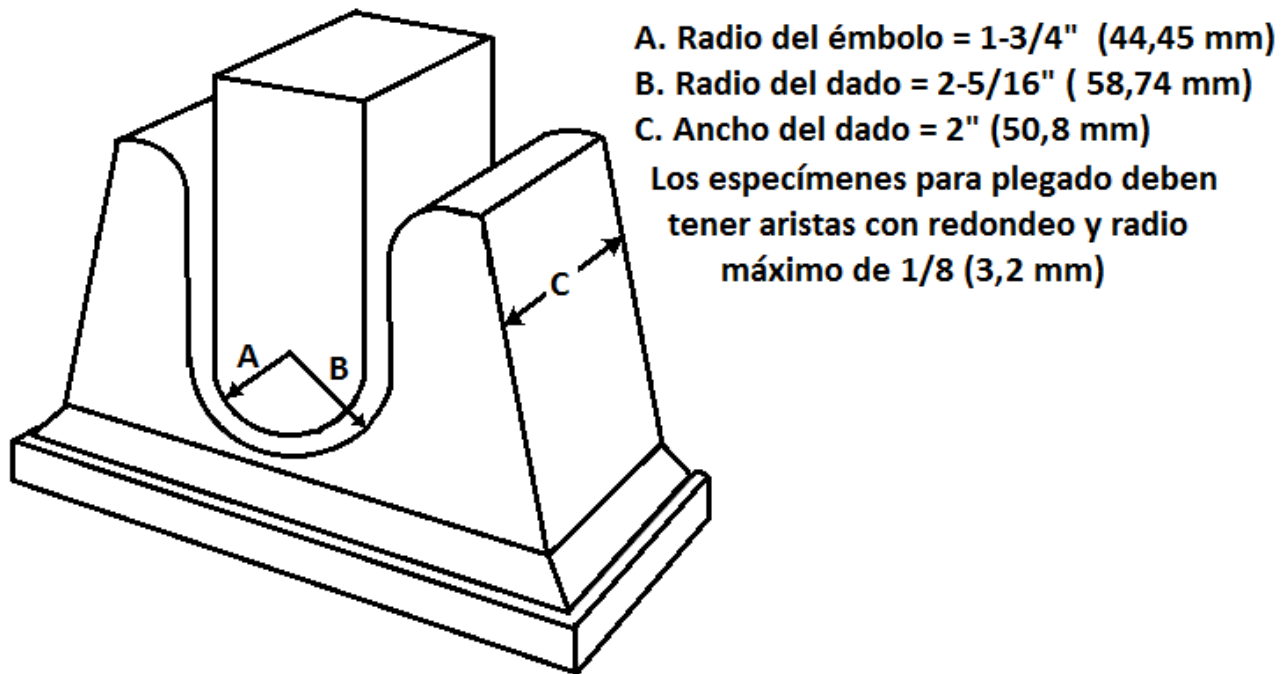


Figura 15.4. Esquema de la matriz de doblado según norma API 1104 (2, 122)

15.1.3. Ensayo de tenacidad

El ensayo de impacto (Charpy) es un ensayo de resistencia al choque para determinar la tenacidad, por medio de la capacidad de absorción de energía del material en la zona de comportamiento plástico antes de que ocurra la fractura en el ensayo. Cuando el material es sujeto a un golpe repentino y violento, la velocidad de deformación puede ser extremadamente rápida, y se puede comportar en una forma mucho más frágil, que en otro tipo de pruebas, por ejemplo, en el ensayo de tensión. Generalmente, se usa el ensayo de impacto para evaluar la fragilidad de un material bajo estas condiciones, en donde las tasas de deformación unitaria son mucho mayores, que en los ensayos de tensión (2). En la figura 15.5 se observa el cupón para en ensayo de tenacidad según la norma API 1104. El instrumento usado para obtener los valores de la energía absorbida por el material durante el impacto es el **péndulo de Charpy**. Este instrumento consta de una masa (Martillo) montada en el extremo del brazo, que pivota sobre un centro, como se observa en la figura

6.6. El ensayo de impacto consiste en dejar caer un péndulo pesado, el cual a su paso golpea una probeta que tiene forma de paralelepípedo, ubicada en unos soportes en la base de la máquina. El péndulo se debe dejar caer desde un ángulo de 90° , para que la velocidad del péndulo, en el momento del golpe y en el punto de golpeo sea aproximadamente de 4.11 m/s y de esta manera cumpla con los requerimientos de la norma que especifica que la velocidad del péndulo en el momento del impacto debe estar entre 3 m/s y 6 m/s. La probeta posee una muesca (entalla) estándar para facilitar el inicio de la fisura, al ser golpeada, con la masa del péndulo que realiza la caída libre desde una altura prefijada (h_0), como se observa en la figura 15.6. (2).

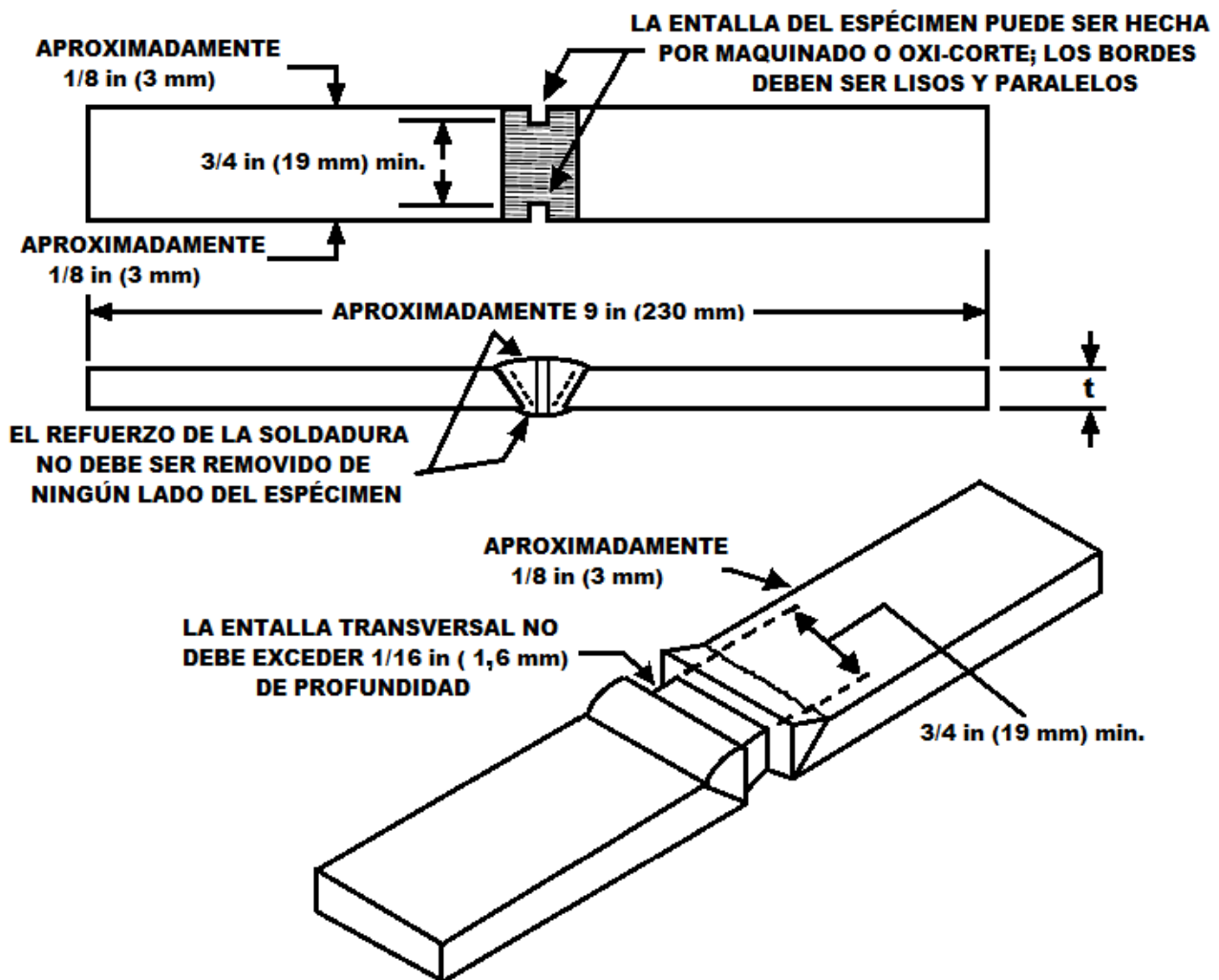


Figura 15.5. Espécimen para el ensayo de tenacidad “Nick Break”, según API 1104 (2, 122)

Luego de golpear la probeta, el péndulo sigue su camino alcanzando cierta altura que depende de la cantidad de energía absorbida por la probeta durante el impacto. Las probetas que fallan en forma frágil se rompen en dos mitades, en cambio aquellas con mayor ductilidad (baja fragilidad) se doblan sin romperse; aunque, estas medidas no se tienen en cuenta. La energía absorbida por la probeta durante el ensayo y que produjo su fractura, es la medida de la tenacidad del material en las condiciones del ensayo. El comportamiento dúctil o frágil de un material depende de las condiciones del ensayo bajo las cuales se realiza, teniendo influencia parámetros tales como; las dimensiones de la probeta, la temperatura, velocidad de aplicación de la carga y las dimensiones de la entalla. Las pruebas de impacto “Nick break” se harán cuando las normas de calificación de procedimientos y soldadores lo requieran (API 1104), en donde los criterios de aceptación estarán de acuerdo con aquella sección que especifica requerimientos de impacto (2).

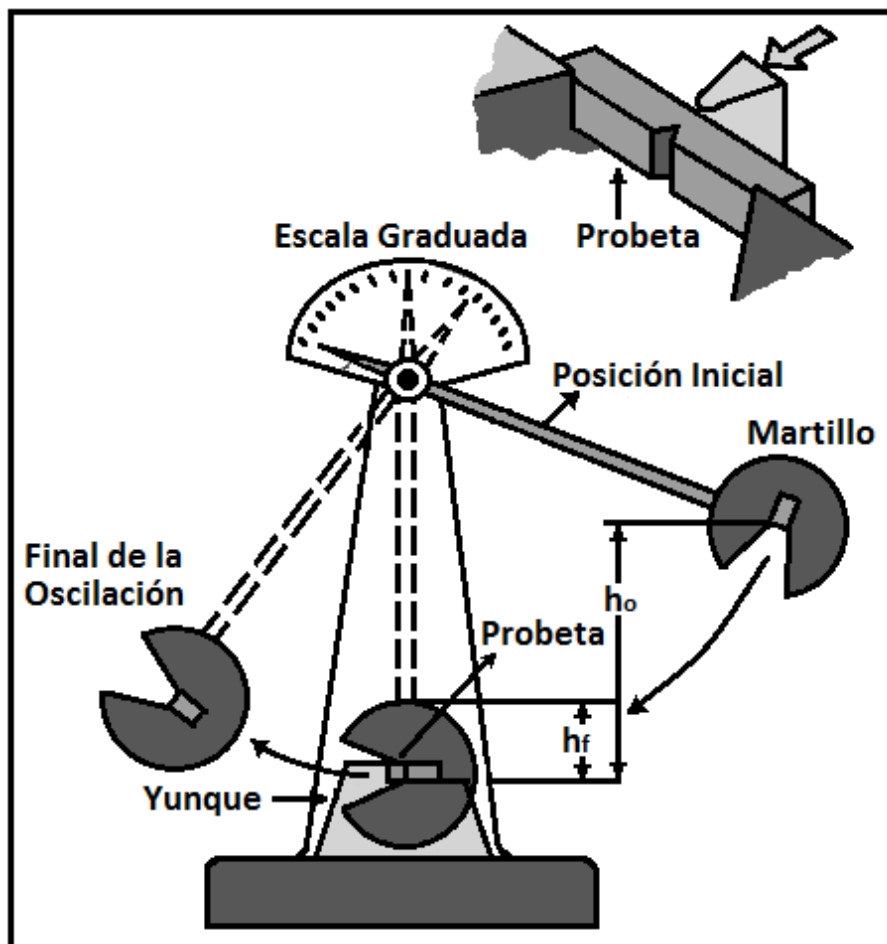


Figura 15.6. Esquema del ensayo de tenacidad “Nick break” (2)

15.1.4. Ensayos de dureza

La dureza está relacionada con la resistencia mecánica y no puede definirse en términos de alguna propiedad específica del material, aunque ésta es conocida como la resistencia que opone un material al tratar de ser rayado o penetrado por otro. La dureza está relacionada con las propiedades elásticas y plásticas del material y no es una propiedad física, pero depende de la combinación de diferentes propiedades físicas. Existen diferentes métodos de medir la dureza de un material y cada uno de esos métodos usa diferentes combinaciones de propiedades. Consecuentemente, medidas de dureza obtenidas por un método muchas veces no pueden ser comparadas con otras obtenidas por un método conocido. Las pruebas de dureza proveen información de los materiales que se están ensayando, además, esta información puede correlacionarse con el esfuerzo a la tensión, ductilidad y otras características físicas de los materiales, además, puede ser usada como control de calidad o de selección de materiales (2).

15.1.4.1. Indentación (Penetración)

El penetrador en un ensayo de dureza es generalmente una esfera, pirámide o cono fabricado de un material mucho más duro que el material a ensayar, como por ejemplo acero endurecido, diamante o carburo de tungsteno sinterizado. En la mayoría de las pruebas patrón, la carga se aplica al oprimir lentamente el penetrador, perpendicularmente a la superficie ensayada, por un tiempo determinado. Según los resultados obtenidos se puede calcular un valor empírico de dureza, conociendo la carga aplicada y el área de la sección transversal o la profundidad de la impresión. El ensayo de dureza nunca se debe realizar cerca del borde de la muestra o cerca de otra penetración ya existente, en este último caso, la distancia mínima para efectuar una penetración es de tres veces el diámetro de la penetración anterior. La microdureza se realiza con cargas entre 1 y 1000 gf y la macrodureza con cargas mayores de 1000 gf (2). En la figura 15.7, se observa un esquema de un durómetro Rockwell.

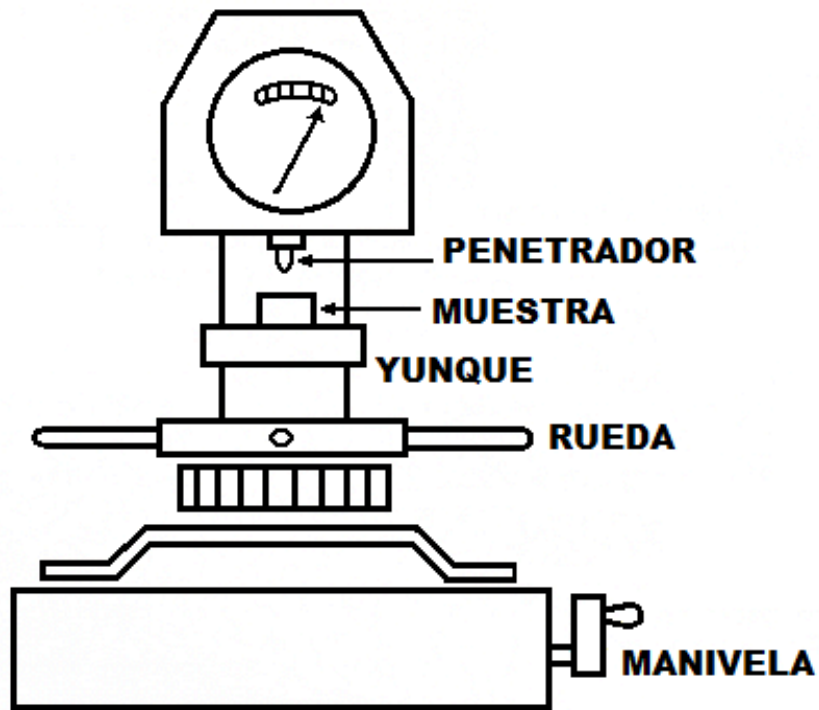


Figura 15.7. Esquema de un durómetro Rockwell (2)

15.1.4.2. Ensayos de microdureza

Este ensayo consiste en generar una huella muy pequeña por la aplicación de cargas muy pequeñas para medir la dureza de zonas de pequeño tamaño. Estos son ensayos de precisión, que se utilizan para evaluar la dureza entre diferentes fases o para analizar la dureza de un recubrimiento, como también para probar materiales cerámicos que son muy frágiles. El principal inconveniente es que necesitan una gran preparación superficial, llegando a requerir pulido metalográfico, también denominado “acabado espejo”. Hay dos clases de ensayos de microdureza. En la dureza Vickers, se utiliza un indentador piramidal de base cuadrada. Las normas recientes limitan el campo de aplicación a cargas de un valor situado entre 5 y 1000 g. El otro ensayo es el ensayo Knoop, el cual utiliza como indentador una pirámide de diamante con ángulos entre aristas de $172^{\circ} 30'$ y 130° . En este ensayo se calcula la superficie a partir de la diagonal principal. La dureza no tiene unidades, aunque el valor corresponde al peso en kg dividido por el área en mm^2 . En ninguno de estos ensayos son comparables los valores a no ser que se haya realizado con la

misma carga; es decir, las huellas no son geoméricamente semejantes (2, 135). En la figura 15.8 se muestra de manera esquemática la forma de los indentadores de microdureza Vickers y Knoop.

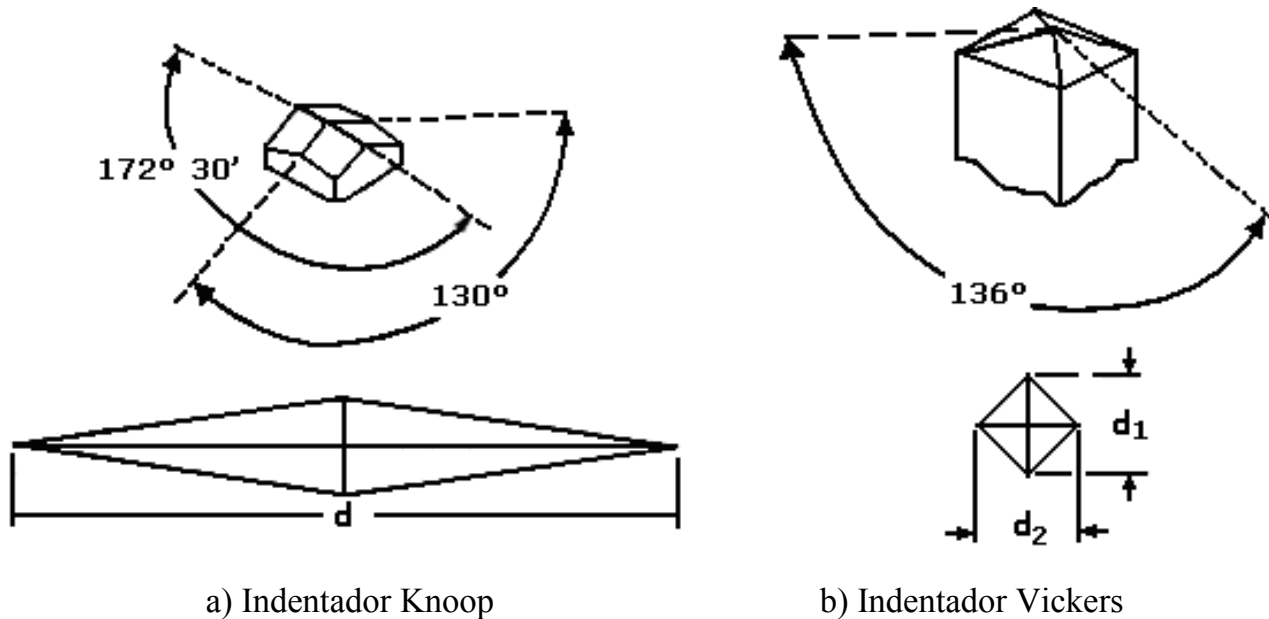


Figura 15.8. Esquema de los indentadores de microdureza Knoop y Vickers (2, 135)

Las pruebas de microdureza Vickers y Knoop han sido rutinariamente usadas para la evaluación de la dureza de todo tipo de materiales. El número Vickers resulta de una división de la carga aplicada por el área de indentación. El procedimiento es dado en la norma ASTM E-384 para la medida de microdureza. En las pruebas de microdureza, la preparación de la superficie se debe hacer por medio de corte, lijado y pulido. Esta prueba es muy útil para evaluar los materiales, control de calidad y en investigación, ya que la microdureza puede ser correlacionada con el esfuerzo de tensión, la ductilidad y la resistencia al desgaste (2).

15.1.4.3. Ensayos de macrodureza

Los ensayos de macrodureza, al igual que los ensayos de microdureza, se determinan en función del grado de penetración en la pieza ensayada a causa de la acción del penetrador

bajo una carga estática dada. El ensayo de macrodureza difiere del ensayo de microdureza, ya que en el ensayo de microdureza las cargas son menores y los penetradores más pequeños dejando una huella menor y menos profunda. Los penetradores pueden ser un cono de diamante o bolas de acero de diámetros específicos. La carga a ser aplicada depende del tipo de material a ser probado. Así, existen diferentes escalas, por ejemplo: HRB (Dureza Rockwell B) para bajas durezas y HRC (Dureza Rockwell C) para materiales más duros. Los procedimientos normalmente se hacen a través de la norma ASTM E 18. Para que las medidas sean representativas de la dureza, es aconsejable usar una distribución sobre la mayor área posible. Además, el ensayo Rockwell no requiere la utilización de fórmula alguna para la determinación de la dureza. Esta se obtiene directamente del dial indicador de la máquina ya que la misma está dada por el incremento de profundidad de penetración debido a la acción del penetrador (2, 136).

16. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN SOLDADURAS

Los ensayos no destructivos (END) o pruebas no destructivas (PND), en inglés NDT, son un campo de la ingeniería de soldadura que se desarrolla rápidamente. Técnicas como la digitalización de imágenes radiografías y el *Phased Arrays*, se han convertido en herramientas de uso cotidiano en las industrias que desean mantenerse en la vanguardia del mercado ofreciendo calidad en sus productos. Las pruebas no destructivas son ensayos de carácter no destructivo, que se realizan a los materiales, ya sean metales, polímeros, cerámicos o compuestos. Estas pruebas se emplean para determinar ciertas características físicas y discontinuidades en los materiales en cuestión. Las pruebas no destructivas son importantes en el continuo desarrollo industrial, ya que permiten determinar la presencia de defectos en los materiales, los cuales pueden causar una falla catastrófica, representando grandes pérdidas en dinero, vidas humanas y daño al medio ambiente. Las pruebas no destructivas (PND), más usadas en soldadura son: la inspección visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, ultrasonido (*Phased array*), radiografía y corrientes de Eddy, aunque no son las únicas técnicas que se pueden utilizar. La inspección visual es la primera prueba no destructiva que se tiene que realizar, ya que se puede obtener información rápidamente, de la condición superficial de los materiales que se están inspeccionando, con el simple uso de la visión humana. Aunque durante la inspección visual se puede ayudar de algún dispositivo como lupas, galgas, calibradores y linternas entre otros, para mejorar la percepción de las imágenes recibidas por el ojo humano. (2)

Los ensayos no destructivos se han desarrollado y evolucionado durante los últimos años y cada uno de ellos tiene ventajas y limitaciones, haciéndolos más apropiados para algunas aplicaciones específicas. En muchas ocasiones existe la posibilidad de aplicar diferentes ensayos no destructivos y es importante seleccionar el método que genere los resultados más confiables con bajos costos. Aunque el inspector de soldadura no requiere certificarse como inspector de pruebas no destructivas para realizar estos ensayos, es muy importante

que tenga un buen conocimiento de estos ensayos, para que conozca las ventajas y limitaciones de cada prueba no destructiva. Lo anterior, ayudará al inspector de soldadura a seleccionar el ensayo no destructivo apropiado para la inspección de la soldadura y le permitirá saber si el especialista en ensayos no destructivos está realizando adecuadamente estas pruebas. También le permitirá entender mejor los resultados de los ensayos no destructivos y podrá obtener información adicional sobre la calidad de la soldadura. Conviene recordar que no hay ningún END definitivo a la hora de emitir una evaluación sobre el estado de una soldadura, sino complementario, con las otras técnicas de inspección no destructiva (2). Los códigos y normas establecen los requisitos de calificación y certificación del personal que realiza las pruebas no destructivas a las uniones soldadas. Los requisitos de calificación de este personal están basados en entrenamiento y experiencia y está descrito en la práctica recomendada SNT-TC-1A emitida por la Sociedad Americana de Ensayos no Destructivos (*American Society for Nondestructive Testing –ASNT*). Este documento SNT-TC-1A establece que sólo personal certificado puede realizar los ensayos no destructivos, en la técnica que están certificados. Este documento tiene tres niveles de certificación, en donde el Nivel I puede hacer ensayos no destructivos bajo la supervisión directa de un inspector de pruebas no destructivas Nivel II o Nivel III. El Nivel II puede realizar las pruebas no destructivas específicas, en la cuales está certificado; solamente el Nivel II y Nivel III pueden interpretar los resultados de la inspección, además la certificación del personal Nivel I y Nivel II son realizadas por un inspector certificado como Nivel III por la ASNT o que ha sido certificado sobre los requisitos establecidos en el documento SNT-TC-1A (2, 137). En cuanto a los requisitos para la realización de las pruebas no destructivas, éstos varían de un código a otro, ya que el código ASME especifica que las pruebas no destructivas deben realizarse cumpliendo todos los requisitos establecidos en su sección V, y el código AWS D1.1 describe los procedimientos de las pruebas radiográficas y por ultrasonido de las soldaduras. Adicionalmente, la Norma API 1104, presenta métodos como: radiografía, partículas magnéticas, líquidos penetrantes y ultrasonido, además establece los requisitos que aplican para cada técnica o remite al usuario las especificaciones ASTM correspondientes (2). A continuación se hará una breve descripción de las pruebas no destructivas más comunes utilizadas en soldadura.

16.1. Inspección por líquidos penetrantes

La inspección por líquidos penetrantes es empleada para detectar e indicar discontinuidades en la superficie de los materiales examinados. Esta prueba consiste en limpiar cuidadosamente la superficie del objeto a ensayar, una vez esté limpia y seca se aplica un líquido visible coloreado o fluorescente en la superficie a examinar, el cual penetra en las discontinuidades del material debido al fenómeno de capilaridad. En partes pequeñas esto se puede lograr sumergiendo la pieza a ensayar en el penetrante y en piezas grandes, el penetrante se puede aplicar mediante spray o un pincel. Después de cierto tiempo (generalmente 10 minutos), se remueve cuidadosamente el exceso de penetrante sobre la superficie para prevenir que el exceso de penetrante enmascare los resultados; además, esta operación de limpieza no debe ser tan intensa que limpie el penetrante de las discontinuidades poco profundas. Una vez se ha removido el exceso de penetrante, se aplica un revelador, el cual generalmente es un polvo blanco seco o suspendido en un líquido volátil que se evapora rápidamente, dejando al polvo sobre la superficie; este polvo absorbe el líquido que ha penetrado en las discontinuidades y sobre la capa de revelador se delinea el contorno de la discontinuidad (2). Es importante que el revelador sea aplicado en capas finas y uniformes. De hecho, una buena práctica es aplicar el revelador en varias capas finas, dejando pasar unos minutos entre la aplicación de cada capa para evitar el recargue excesivo, ya que las capas finas de revelador puede marcar indicaciones muy pequeñas. La limpieza previa a la aplicación del líquido penetrante es muy importante, ya que esta etapa puede ser determinante en el éxito de esta técnica, lo anterior se debe a que si las discontinuidades están tapadas con suciedad, grasa, aceites humedad, polvo y óxidos, entre otros, el penetrante no podrá entrar en la discontinuidad y por tal motivo no podrá revelar (2,138, 139).

En general los líquidos penetrantes se pueden clasificar en dos categorías según el tipo de indicación producida (penetrantes visibles y fluorescentes) y por el método de remoción del exceso del penetrante (removibles con agua, solvente o post-emulsificante). El penetrante visible (generalmente rojo), produce un color rojo vivo contra un revelador blanco cuando

se ve bajo luz blanca. El penetrante fluorescente produce un color fluorescente verdoso cuando es observada bajo luz ultravioleta (negra), el ensayo fluorescente es un método de ensayo más sensible que el penetrante visible. Los penetrantes removibles con agua contienen un emulsificador que permite al penetrante aceitoso levantarse con una baja presión de agua en spray. Los penetrantes removibles mediante solvente requieren un solvente para remover el exceso de penetrante del objeto a ensayar y los penetrantes post-emulsificantes son removidos agregando un emulsificador después de que el líquido penetrante ha ingresado a la discontinuidad. La aplicación del emulsificador al penetrante sobre la superficie de ensayo permite que el penetrante sea removido de la misma forma del removedor a base de agua. Combinando las características de estas dos clasificaciones, pueden producirse seis tipos diferentes de penetrantes: (2)

1. Visible/Removible mediante agua.
2. Visible/Removible mediante solvente.
3. Visible/Post-emulsificante.
4. Fluorescente/Removible mediante agua.
5. Fluorescente/Removible mediante solvente.
6. Fluorescente/Post-emulsificante.

Existen 18 variantes de inspección empleando este método; cada una de ellas ha sido desarrollada para una aplicación y sensibilidad específica. Así por ejemplo, si se requiere detectar discontinuidades con un tamaño de aproximadamente medio milímetro, debe emplearse un penetrante fluorescente, removible por post-emulsificación y un revelador seco. En la figura 16.1, se observa cómo se aplican los líquidos penetrantes en una pieza. Por otra parte, si lo que se necesita es detectar discontinuidades mayores a 2,5 mm, conviene emplear un penetrante contrastante, lavable con agua y un revelador en suspensión acuosa. Con cualquiera de estos tipos, los pasos básicos son los mismos, excepto para los penetrantes post-emulsificantes que requieren un paso adicional para aplicar el emulsificador. Por eso, con cualquiera de los métodos, hay cuatro pasos generales a seguir, para realizar este ensayo que es relativamente fácil de hacer. Aunque, es

importante que cada uno de estos pasos sea realizado cuidadosamente y en la secuencia apropiada; de otra manera, los resultados del ensayo no serán confiables (2).

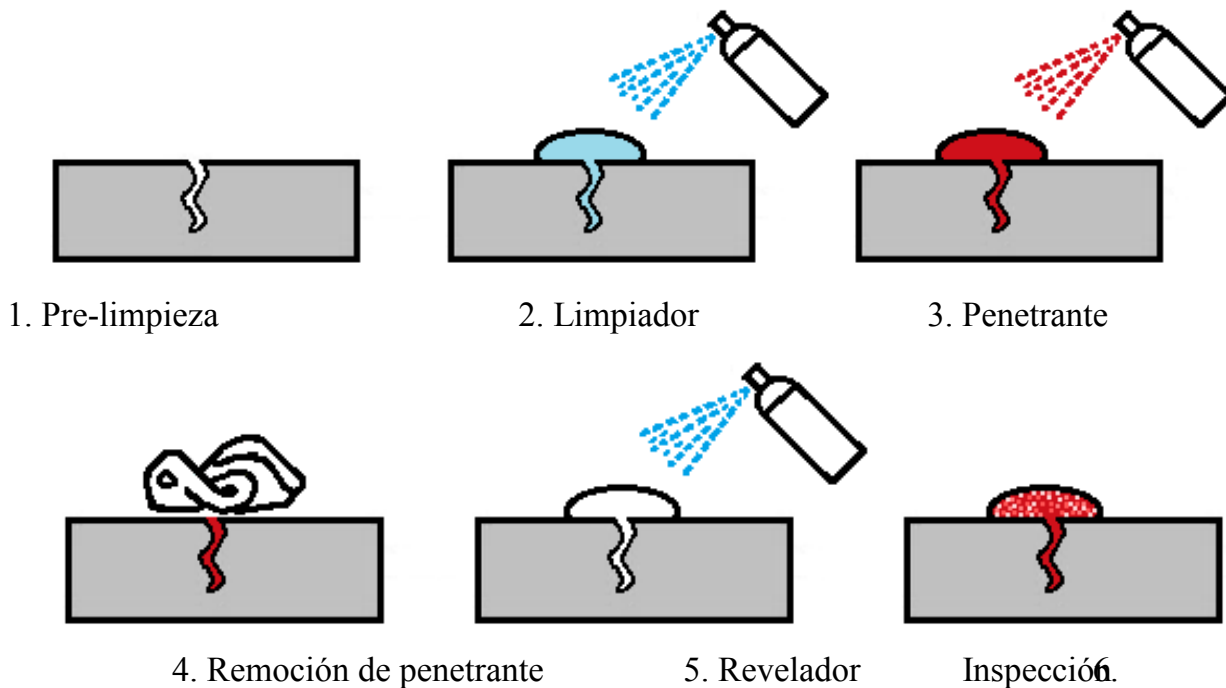


Figura 16.1. Técnica usada para ensayos por tintas penetrantes (2, 139)

Los líquidos penetrantes no son buenos en superficies porosas o con bastante rugosidad superficial, ya que no habría posibilidad de remover totalmente el exceso de penetrante causando enmascaramiento de resultados, además la aplicación del penetrante se ve afectada por la temperatura de la pieza, superficies muy frías (debajo de 10 °C) o muy calientes (encima de 52 °C) no son recomendadas para el ensayo. En algunas aplicaciones se requiere que la post limpieza sea efectuada de la manera más completa posible (caso de maquinaria de industria alimenticia, material a ser soldado posteriormente, etc.). Esto puede tomarse como una limitación del ensayo cuando esa limpieza no es fácil de realizar (2).

16.2. Inspección por partículas magnéticas

La inspección por partículas magnéticas permite detectar discontinuidades superficiales y sub-superficiales en materiales ferromagnéticos como hierro, acero, níquel, cobalto y

algunas de sus aleaciones. Los materiales ferromagnéticos son aquellos que pueden ser magnetizados a un nivel tal que permitan que la inspección sea efectiva. Se selecciona este proceso cuando se requiere una inspección más rápida que con los líquidos penetrantes, además la limpieza superficial no es tan crítica como en otros métodos no destructivos. El principio del método es la formación de distorsiones en el campo magnético o la formación de polos cuando se genera o se induce un campo magnético en un material ferromagnético; es decir, cuando la pieza presenta una zona en la que existen discontinuidades perpendiculares a las líneas del campo magnético, éste se deforma o produce polos. Las distorsiones o polos atraen a las partículas magnéticas, que fueron aplicadas en forma de polvo o suspensión en la superficie sujeta a inspección y por acumulación producen las indicaciones que se observan visualmente de manera directa o bajo luz ultravioleta. Los mejores resultados se obtienen cuando las líneas del campo magnético están formando ángulos rectos con la discontinuidad, ya que hay una mayor fuga de campo magnético. Cuando se usa corriente eléctrica para generar la magnetización, los mejores resultados se logran cuando la dirección de la corriente corre paralela a la discontinuidad ya que las líneas de campo siempre están a 90° del flujo de corriente (2, 138). En la figura 16.2, se observa un esquema de las líneas de fuerza de los campos magnéticos.

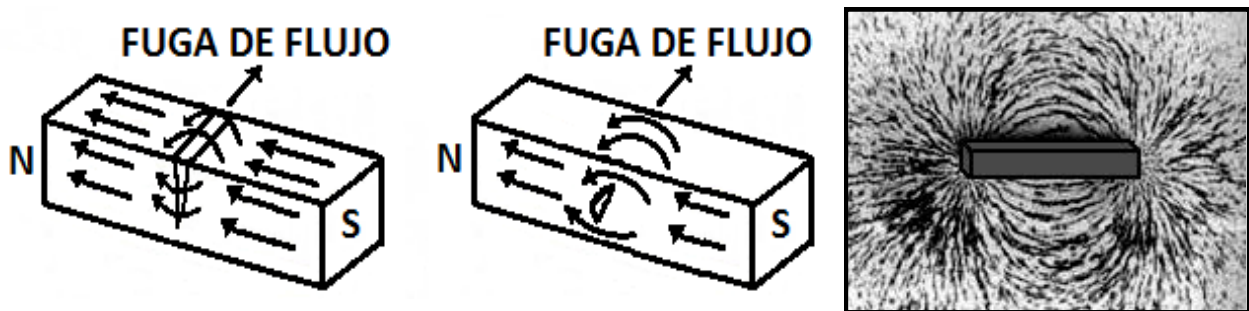


Figura 16.2. Esquema de las líneas de fuerza de los campos magnéticos (2)

El conocimiento de los principios del magnetismo mejora el entendimiento de este método no destructivo. Las líneas magnéticas de fuerza, o líneas de flujo magnético tienden a viajar desde un extremo del imán (polo) hacia el extremo opuesto (el otro polo). Estos polos son designados como polo norte y polo sur. Las líneas de flujo magnético forman líneas de fuerza continuas que viajan desde un polo hacia el otro en una dirección. Estas líneas

siempre permanecen virtualmente paralelas una a la otra y nunca se cruzan entre sí. La fuerza de estas líneas de flujo magnético depende de la intensidad del campo magnético resultante; y es mayor cuando están totalmente contenidas adentro de un material magnético o ferroso. Aunque van a viajar a través de algunas separaciones rellenas con aire, su intensidad es reducida significativamente a medida que la longitud de la separación aumenta (2). Para realizar un ensayo de partículas magnetizables, debe haber una generación de un campo magnético en la pieza a ensayar; una vez que la parte ha sido magnetizada, las partículas de hierro son rociadas sobre la superficie. Si hay discontinuidades en la soldadura, estas partículas van a ser atraídas y sostenidas en la discontinuidad generando una indicación visual. El ensayo se puede realizar con imanes permanentes o con un equipo electromagnético (electroimán), que genera un campo magnético cuando pasa electricidad a través de un conductor, este campo magnético que se desarrolla se orienta perpendicular a la dirección de la electricidad. Los electroimanes pueden generar dos tipos básicos de campos magnéticos que son el longitudinal y el circular. El magnetismo longitudinal es cuando el campo magnético se orienta a lo largo del eje de la pieza y el magnetismo circular es cuando el campo magnético es perpendicular al eje de la pieza (2).

El magnetismo del campo magnético circular está totalmente contenido adentro del material ferromagnético mientras que el campo magnético longitudinal es inducido en la pieza por el conductor eléctrico que lo envuelve. Por esta razón, el campo magnético circular es considerado más potente y más sensible para un nivel dado de corriente eléctrica. Cuando se trata de determinar la orientación de las discontinuidades que pueden generar una indicación, se debe empezar por determinar la dirección de la corriente eléctrica, luego considerar la dirección del campo magnético inducido y después determinar la orientación de la discontinuidad que va a dar la sensibilidad óptima (2).

Para generar un campo magnético se puede utilizar corriente alterna (AC) o corriente continua (DC), en donde el campo magnético generado con corriente alterna es más fuerte en la superficie del objeto a ensayar, ya que la corriente alterna provee una mayor

movilidad de las partículas en la superficie de la pieza, lo que ayuda en la detección de discontinuidades, aun en superficies de piezas rugosas o irregulares. La corriente continua induce campos magnéticos con mayor poder de penetración y pueden ser usados para detectar discontinuidades cerca de la superficie; aunque estas indicaciones son muy difíciles de interpretar. Un tercer tipo de corriente eléctrica es conocida como corriente alterna rectificadora de media onda y puede ser pensada como una mezcla de corriente alterna con corriente continua. Con este tipo de corriente se pueden alcanzar los beneficios de ambos tipos de corrientes (2). En la figura 16.3, se observa un esquema de la aplicación del ensayo de partículas magnéticas.



Figura 16.3. Aplicación del ensayo de partículas magnéticas

El ensayo de partículas magnéticas es más sensible a las discontinuidades perpendiculares, a las líneas de flujo magnético y las discontinuidades paralelas a las líneas de flujo no son detectadas. Cuando el ángulo formado entre el eje de la discontinuidad y las líneas de flujo magnético es mayor de 45° , la discontinuidad va a formar una indicación que se puede observar más fácilmente, pero con ángulos menores de 45° la discontinuidad puede que no sea detectada. Por esto, para poder hacer una evaluación completa de la pieza y localizar las discontinuidades en todas las direcciones es necesario aplicar el campo magnético en dos direcciones perpendiculares y evaluar las posibles indicaciones que se forman. El equipamiento usado con este método varía en tamaño, portabilidad y costo. El yugo electromagnético de corriente alterna con patas articuladas, son muy portátiles y útiles para inspeccionar zonas de difícil acceso y objetos muy grandes como edificios, puentes,

tanques, recipientes o grandes soldaduras. Otros equipos no tan portátiles son las bobinas y las puntas de contacto, ambos necesitan de fuentes especiales y por tal motivo tienen una movilidad limitada (2, 3, 139).

Las partículas de acero (polvo de hierro) usadas son muy pequeñas y se pintan de color vivo para que se pueda contrastar con la pieza que se va a inspeccionar. Los colores disponibles son gris, blanco, negro, rojo, azul y amarillo. Estas partículas son conocidas como visibles y se deben usar bajo una buena iluminación, aunque hay partículas magnéticas fluorescentes que se observan bajo luz ultravioleta y tienen una mayor sensibilidad. Las partículas magnéticas pueden ser aplicadas en seco por medio de sopladores o bulbos rociadores, con un chorro de aire de baja velocidad (método seco), produciendo una dispersión uniforme de las partículas en el aire, ya que tendrán que dirigirse hacia los campos de fuga magnética; otra forma de aplicar las partículas magnéticas son por vía húmeda utilizando aceite liviano, disolventes o agua (método húmedo) (2, 3). Ambos métodos son usados frecuentemente, pero el método húmedo tiene una mayor sensibilidad. Las ventajas del método de partículas magnetizables es que es rápido y de bajo costo, además este ensayo puede hacerse a través de capas muy finas de recubrimiento. La mayor limitación de las partículas magnéticas es que solo se puede usar en materiales ferromagnéticos. Otras limitaciones son que no revelan discontinuidades a profundidades mayores a $\frac{1}{4}$ in, la rugosidad superficial puede distorsionar el campo magnético, se requieren dos o más inspecciones secuenciales con diferentes magnetizaciones, en donde la segunda inspección se debe hacer con las líneas de flujo magnético perpendiculares a la realizada en la primera inspección; los recubrimientos gruesos pueden enmascarar las discontinuidades y que la mayoría de las partes requieren una des-magnetización después del ensayo. La desmagnetización se realiza con corriente alterna, alejando lentamente la pieza del campo magnético o reduciendo la corriente de inducción aplicada a la pieza a cero (0) (2, 3). Otra posibilidad es cambiar la posición de los polos del yugo en la pieza examinada, es decir, donde estaba el polo sur poner el polo norte y viceversa (2, 3).

16.3. Inspección por ultra-sonido

La inspección por ultrasonido se define como un procedimiento de inspección no destructiva de tipo mecánico, basado en la impedancia acústica, la cual se manifiesta como el producto de la velocidad máxima de propagación del sonido y la densidad del material. Los equipos de ultrasonido permiten detectar discontinuidades superficiales, subsuperficiales e internas, dependiendo del tipo de palpador utilizado y de las frecuencias que se seleccionen dentro de un ámbito de 0,25 MHz hasta 25 MHz. Estas ondas sonoras de alta frecuencia, están por encima del rango audible por el ser humano, y permiten medir las propiedades geométricas y físicas en los materiales (2).

Las ondas ultrasónicas son generadas por un cristal o cerámico piezoeléctrico dentro del palpador; este elemento, que llamaremos transductor, tiene la propiedad de transformar la energía eléctrica en forma de voltaje en energía mecánica (ondas sonoras) y viceversa. Al ser excitado eléctricamente, y por el efecto piezoeléctrico, el transductor vibra a altas frecuencias, generando ultrasonido, ya que cuando el transductor se excita por pulsos electrónicos, este responde con una vibración mecánica, y crea una onda sonora que se transmite a través del objeto de ensayo a la velocidad que sea típica del material. El transductor que realiza esta conversión de energía, debido al efecto “piezoeléctrico”, está fabricado por distintos materiales, tanto naturales como el cuarzo, como los fabricados artificialmente como el titanato de bario, sulfato de litio y cerámicas polarizadas. Un material piezoeléctrico producirá un cambio mecánico en una dimensión cuando se excita con un pulso eléctrico. De igual forma, este mismo material producirá un pulso eléctrico cuando se actúa sobre él en forma mecánica (2, 3, 138, 140).

Estas vibraciones son transmitidas al material que se desea inspeccionar y durante el trayecto en el material, la intensidad de la energía sónica sufre una atenuación, que es proporcional a la distancia del recorrido. La onda sonora generada continuará viajando a través del metal a una velocidad dada y retornará al transductor cuando encuentre alguna discontinuidad, tal como un cambio de densidad o cuando el haz sónico alcanza la frontera

del material y es reflejado. Si este reflector está orientado apropiadamente, rebotará el sonido de retorno hacia el transductor a la misma velocidad y contactará al transductor. Cuando es impactado por dicha onda sonora que retorna, el cristal piezoeléctrico convertirá esta energía sonora nuevamente en pulsos electrónicos y su señal es filtrada e incrementada para ser enviada a un osciloscopio de rayos catódicos, en donde la trayectoria del haz es indicada por las señales de la pantalla; también puede ser transmitida a un sistema de graficado, donde se obtiene un perfil acústico de la pieza en una pantalla digital, donde se leerá un valor para el análisis matemático de la información lograda. Las ondas sonoras viajan a distintas velocidades en los distintos materiales, sin embargo, la velocidad de propagación del sonido en un material dado, tiene un valor constante para ese material (2). El sonido, o las vibraciones, en forma de ondas elásticas, se propagan a través del material hasta que pierde por completo su intensidad o hasta que se encuentra con una interfaz, es decir algún otro material, y como consecuencia, las ondas pueden sufrir reflexión, refracción o distorsión, lo cual puede traducirse en un cambio de intensidad, dirección y ángulo de propagación de las ondas originales. De esta manera, es posible aplicar el método de ultrasonido para determinar ciertas características de los materiales tales como: (2)

- Velocidad de propagación de ondas.
- Tamaño de grano en metales.
- Presencia de discontinuidades (grietas, inclusiones, poros, laminaciones, etc.).
- Adhesión entre materiales.
- Inspección de soldaduras.
- Medición de espesores de pared.

Por medio del método de ultrasonido es posible obtener una evaluación de la condición interna del material en cuestión. Sin embargo, el método de ultrasonido es más complejo, lo cual demanda personal calificado para su aplicación e interpretación de indicaciones o resultados de prueba. La prueba de ultrasonido se lleva a cabo por la transmisión de la onda ultrasónica a través del material, el cual produce una reflexión y una refracción en el límite del material o de la discontinuidad. La onda que continúa viaja a través del material y produce una segunda reflexión y refracción en la superficie del material. El intervalo de

tiempo entre las reflexiones se mide para determinar las propiedades del material (2). En la figura 16.4, se muestra un transductor acústicamente acoplado en la superficie de un material.

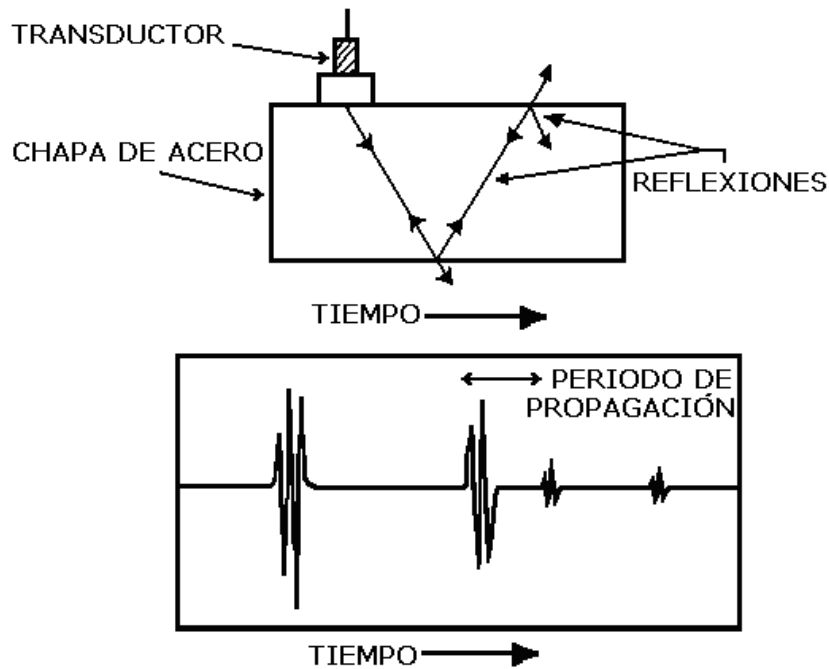


Figura 16.4. Técnica usada para medidas de ultrasonido (2)

En la actualidad existen diversas metodologías de inspección ultrasónica que han evolucionado a la par con el avance de la electrónica. La normatividad internacional ha incorporado estas tecnologías de inspección de última generación, las cuales emplean tratamiento computarizado de imágenes para obtener altas probabilidades de detección, registros permanentes y auditables para la construcción e inspección de recipientes a presión, tuberías de proceso, ductos y tanques de almacenamiento. Por otra parte, en todo el mundo, estas tecnologías de ultrasonido están remplazando a las radiaciones ionizantes (ensayo RX y gammagrafía) al no generar ningún tipo de riesgo para las personas y no contaminar el planeta.

Los gerentes de proyectos y constructores han aprendido que el verdadero ahorro se encuentra en no parar el avance de la obra para la toma de placas y en reducir el número de rechazo al obtener resultados más precisos y oportunos, que permiten establecer controles

al proceso. Para que la inspección ultrasónica tenga alta confiabilidad es necesario asegurar tres elementos igualmente importantes: equipos apropiados, metodologías y procedimientos validados y personal competente. La inspección ultrasónica debe ser ejecutada de acuerdo con un procedimiento escrito. Esto debe ser revisado y firmado por un ASNT Nivel III en ultrasonido. Antes de la aprobación final del procedimiento, se deberá demostrar la aplicación del procedimiento y sistema ultrasónico propuesto. Se deberá generar un reporte de la demostración (validación) donde se documente los resultados en el bloque de calificación (2, 141, 142).

Durante el ensayo de ultrasonido hay que asegurarse que el palpador o transductor esté bien acoplado a la pieza a ensayar, para esto se utiliza medios acoplantes como gel, grasa, aceites, glicerina y vaselina entre otros, para tener un buen acople sin aire entre el palpador y la pieza a inspeccionar, también hay que tener en cuenta la superficie del objeto de ensayo, la cual debe estar totalmente suave, ya que una superficie muy rugosa puede causar errores en la medición; además se dispone de varios tamaños y estilos de transductores, los cuales están montados en cuñas de plexiglás; esta cuña permite entrar el ultrasonido en la pieza de ensayo con distintos ángulos para la prueba con ondas transversales (2, 3). Debido a que el sonido de alta frecuencia no se transmite fácilmente a través del aire, se coloca un líquido o medio acoplante entre la pieza a ensayar y el transductor para mejorar el contacto. Una limitación de este método es que requiere operadores altamente capacitados y experimentados debido a la dificultad para realizar el ensayo y la interpretación de los resultados. Este método de inspección requiere normas de referencia y generalmente se limita a soldaduras a tope en materiales con espesores mayores a $\frac{1}{4}$ in (2, 3, 138).

Los instrumentos de inspección ultrasónica requieren de ser calibrados, para poder obtener e interpretar correctamente las indicaciones (señales) que generen las posibles discontinuidades del material sujeto a inspección. Las señales deben ser ajustadas en su amplitud (altura en la escala vertical de la pantalla) y en su recorrido en el material inspeccionado (escala horizontal de la pantalla), para conocer la severidad y ubicación de la discontinuidad. En las inspecciones por ultrasonido, generalmente, las indicaciones son

comparadas con las indicaciones de un reflector conocido de un bloque de referencia o bloque de calibración. Estos bloques de acero tienen dimensiones y perfiles específicos, para que el equipo de ultrasonido puede ser calibrado midiendo el tiempo que tarda el sonido en cubrir una trayectoria del viaje y convertir dicho tiempo en la dimensión de la pieza, y de esta forma realizar el ajuste electrónico del equipo de ultrasónico, para evaluar las indicaciones de las discontinuidades de la muestra inspeccionada. El equipo de ultrasonido permite al operador medir el tiempo del sonido al viajar a través de un material hasta un reflector, y retornar hacia el transductor, para generar la información necesaria de la dimensión, como es la distancia del reflector debajo de la superficie y su tamaño (2, 3).

El transductor se ubica en diferentes espesores del bloque de calibración y se ajusta el instrumento para dar una representación en la pantalla del equipo. Una vez terminada la operación de calibración, el operador puede leer la dimensión de la pieza de ensayo directamente de la pantalla notando cuándo la indicación crece en forma vertical a lo largo del eje horizontal (2, 3). Dependiendo del código o norma aplicable, se puede emplear un bloque o juegos de bloques específicos. Al realizar el ajuste de un sistema de inspección con un bloque de calibración, podemos verificar que en el sistema de inspección funcionen adecuadamente: ajustar la ganancia o sensibilidad con la cual se detectarán las discontinuidades, conocer la severidad de la discontinuidad, conocer el tamaño de la discontinuidad, ajustar la señal para conocer la distancia de recorrido del ultrasonido en el material inspeccionado. Ajustar la profundidad a la que se encuentra la discontinuidad (haz recto y doble cristal), y ajustar la distancia recorrida del sonido (haz angular) (2).

La pantalla del equipo provee al operador dos tipos de información. En una las indicaciones aparecerán en varias ubicaciones a lo largo del eje horizontal de la pantalla. (Siempre habrá una indicación, llamada 'indicación del eco de interfaz o eco inicial, que se ubicará cerca del lado izquierdo de la pantalla). Cuando el sonido entra a una pieza y rebota desde un reflector volviendo al transductor, su retorno es indicado por una señal que crece verticalmente de la línea horizontal. En segundo lugar la altura de la señal puede medirse y da una medida relativa de la cantidad de sonido reflejado. Una vez que se calibró el

instrumento, la ubicación de la indicación del reflector en el eje horizontal puede ser relacionada con la distancia física que ha viajado el sonido en la pieza para llegar al reflector. La altura de esa señal en la pantalla es una indicación relativa del tamaño del reflector. Usando dicha información, el operador experimentado puede determinar frecuentemente la naturaleza y tamaño del reflector y relacionarlo con un código o especificación para aceptar o rechazar la soldadura inspeccionada (2, 3, 140). En la figura 16.5 se observa la realización de una prueba no destructiva.



Figura 16.5. Aplicación del ensayo de ultrasonido en soldaduras (2, 140)

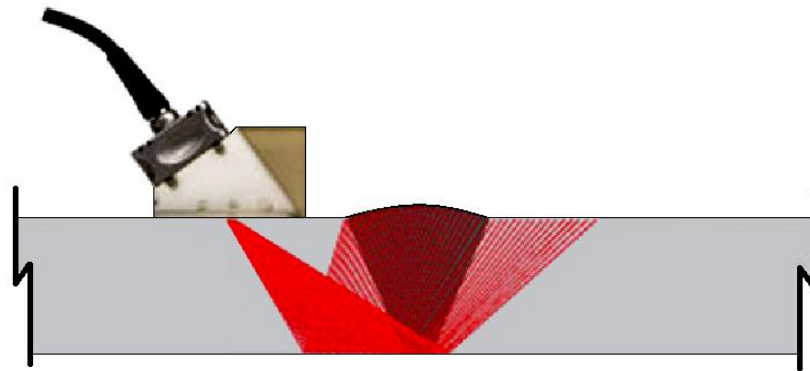
Hay dos tipos de transductores de ultrasonidos básicos, los transductores de haz recto, que emiten ondas longitudinales y se usan para determinar la profundidad de una discontinuidad debajo de la superficie del material. Estos transductores transmiten el haz dentro de la pieza en forma perpendicular a la superficie de la pieza y también son útiles para medir espesores. Los transductores de haz en ángulo que emiten ondas transversales, ya sean ondas de corte, de superficie o de placa; estos transductores se usan en forma extensiva para la evaluación de soldadura debido a que envían el haz dentro de la pieza en ángulo, permitiendo que el ensayo se realice sin remover el sobre-espesor áspero de la soldadura. Generalmente el transductor de haz longitudinal se fija a una cuña de plexiglás (zapata), la cual provee el ángulo de entrada de la onda (2, 3). Los ángulos comerciales para estas zapatas son 35°, 45°, 60°, 70°, 80° y 90°. En la elección del transductor hay que tener en

cuenta la clase del cristal, ya que este afecta el poder de resolución y la sensibilidad del ensayo; también hay que tener en cuenta el diámetro del cristal, ya que entre mayor sea el diámetro del cristal, se obtiene una mayor profundidad de penetración, asimismo una mayor longitud en un campo cercano y una menor divergencia. Por último, se debe tener en cuenta la elección de la frecuencia, ya que con la elección de una mayor frecuencia se obtiene mayor posibilidad para la identificación de discontinuidades pequeñas, mayor longitud de campo cercano, mayor poder resolutivo, menor profundidad de penetración y mínima divergencia (2, 3, 142).

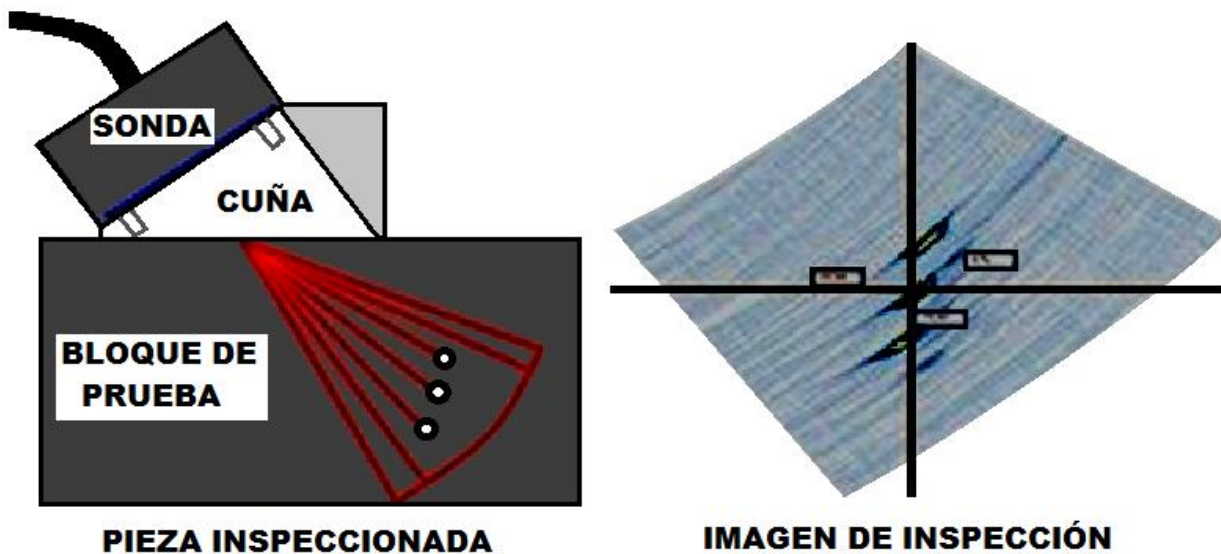
Ensayo de ultrasonido por arreglo de fases (*Phased array*): La inspección convencional por ultrasonidos consiste en un transductor o piezoeléctrico que genera y recibe ondas de sonido de alta frecuencia, o en ciertas ocasiones se utilizan dos transductores; uno para transmitir y otro para recibir. Estos transductores generan un pulso ultrasónico que se propaga en el material produciendo una reflexión en todos los puntos donde encuentre una discontinuidad (cara inferior del material, fisuras, inclusiones de escoria, delaminaciones, entre otras) quedando éstas registradas mediante el pulso reflejado. El tiempo entre el pulso de entrada y la reflexión producida por la indicación están directamente relacionados con la distancia recorrida según la velocidad de propagación de las ondas acústicas en el material, por lo que se puede obtener información acerca de la posición de la discontinuidad detectada (2).

El sistema *phased array* es una herramienta muy flexible y versátil que puede inspeccionar varios tipos de discontinuidades, con diferentes tipos de palpadores, obteniendo un claro y seguro diagnóstico de las fallas presentes en la pieza analizada. El sistema *phased array* consta de un conjunto de transductores que pueden ser de 16 a 256 elementos individuales, donde cada uno puede ser pulsado por separado. Estos pueden estar dispuestos en forma de tira, anillo o formas más complejas. Las frecuencias más comunes del transductor están entre 2 MHz a 10 MHz. El sistema de arreglo de fases también incluye un *software* que es capaz de conducir la sonda y la digitalizar los ecos de retorno en varios formatos estándar. A diferencia de detectores de fallas convencionales, los sistemas *phased array* pueden

barrer con un haz de ultrasonido dirigido electrónicamente, a través de una gama de ángulos refractados a lo largo de una trayectoria lineal, o centrarse dinámicamente en un número de diferentes profundidades, lo que aumenta la flexibilidad y la capacidad de las configuraciones de inspección (2, 141, 143). En la figura 16.6 se observa un esquema de inspección por *phased array*.



a) Esquema de inspección de una soldadura por *phased array*



b) Esquemática de la pieza y la imagen de inspección por *phased array*.

Figura 16.6. Esquemas de inspección por *phased array* (2, 143, 144)

El *software* establece tiempos de retardo específicos con el fin de generar la forma del haz deseado, teniendo en cuenta las características de la sonda y de la zapata, así como la geometría y las propiedades acústicas del material de prueba. La secuencia de pulsos programada por el software del instrumento lanza una serie de frentes de onda individuales

al material de ensayo. Estos frentes de onda a su vez se combinan constructivamente y destructivamente en un solo frente de onda primaria que viaja a través del material de ensayo y se refleja en las discontinuidades como grietas, delaminaciones entre otras, como cualquier onda ultrasónica convencional. El haz se puede dirigir de forma dinámica a través de diversos ángulos, distancias focales, y tamaños de punto focal, de tal forma que un único conjunto de sonda es capaz de examinar el material de prueba a través de una gama de diferentes perspectivas. Esta orientación de haz sucede muy rápidamente, de modo que una exploración desde múltiples ángulos o con múltiples profundidades focales se puede realizar en una pequeña fracción de un segundo (2).

Sistemas de ultrasonidos (*phased array*) potencialmente se pueden emplear en casi cualquier prueba en la que tradicionalmente se han utilizado detectores de defectos por ultrasonidos convencionales. La inspección de soldaduras y detección de fisuras son las aplicaciones más importantes, y estas pruebas se realizan a través de una amplia gama de industrias, incluyendo la aeroespacial, generación de energía, petroquímica, siderúrgica, así como también en construcción y mantenimiento de estructuras y tuberías. El *phased array* o arreglos de fase también se pueden utilizar para medir el perfil del espesor de pared restante en aplicaciones de corrosión (2, 145).

El beneficio de la tecnología del *phased array* sobre el ultrasonido convencional, es su capacidad de utilizar múltiples elementos para dirigir, enfocar y analizar las piezas con un solo conjunto de transductores. Esto puede simplificar en gran medida la inspección de componentes con geometrías complejas. El pequeño tamaño del transductor y la capacidad de barrer del haz sin mover la sonda también ayuda a la inspección de tales componentes en situaciones en las que hay un acceso limitado para la exploración mecánica. Además, la capacidad de probar soldaduras con múltiples ángulos a partir de una única sonda, aumenta en gran medida la probabilidad de detección de discontinuidades. La capacidad de concentrarse en múltiples profundidades también mejora la capacidad para el dimensionamiento de defectos críticos para las inspecciones volumétricas, lo cual mejora significativamente la relación señal-ruido en aplicaciones exigentes. El ultrasonido *phased*

array se utiliza en soldadura de tuberías a partir de diámetros de 2” y espesores a partir de 4,8 mm, además esta técnica está avalada por las normas ASME, AWS y API (2, 143, 145).

Ventajas:

- Inspecciona el perfil de la soldadura sin que haya el convencional proceso de aproximación y alejamiento del transductor de la soldadura.
- Permite focalizar el haz ultrasónico, ejecutar escaneado con múltiples ángulos simultáneamente.
- Aumento de la confiabilidad de la inspección, reduciendo la subjetividad de la inspección de ultrasonido manual.
- Mejor constatación de defectos, ya que la inspección no está limitada a los ángulos convencionales (45°, 60° y 70°).
- Reducción de los tiempos de inspección en relación al ultrasonido manual, ya que la inspección puede ser hecha con todos los ángulos programados simultáneamente y el escaneado perpendicular a la soldadura es hecho de modo electrónico en lugar de manual.
- Datos más precisos, mejorando el control de la calidad de las soldaduras, permitiendo dimensionar la altura, la profundidad y la extensión de las discontinuidades.
- Es la tecnología ideal para contribuir con la radiografía en proyectos que necesitan de rapidez en la obtención de resultados con igual precisión y confiabilidad en las inspecciones, sin las desventajas del ultrasonido manual (falta de registro y subjetividad) y ofreciendo soporte a la radiografía cuando haya interferencias donde ella no podrá ser utilizada de forma continúa.
- Esta tecnología puede ser utilizada tanto para soldaduras de tuberías como para las soldaduras de piezas y equipos.

16.4. Inspección por radiografía

La radiografía es un método usado para la inspección no destructiva basado en el principio de transmisión o absorción de radiación preferencial penetrante por la pieza que ésta siendo

inspeccionada. Debido a diferencias en las características de absorción causada por las variaciones de masa, composición y estructura del material, diferentes regiones de una misma pieza absorberán cantidades diferentes de radiación. Las áreas de espesor reducido o menor densidad transmiten más, y en consecuencia absorben menos radiación. Esa absorción diferencial de radiación podrá ser detectada a través de una película, o a través de una imagen, ya que la radiación que pasa a través del objeto de ensayo, formará una imagen con diferentes contrastes en una película que recibe la radiación, o por detectores electrónicos de radiación. Esa variación de la cantidad de radiación absorbida se detecta a través de un medio, el cual indicará, entre otras cosas, la existencia de una discontinuidad interna en el material (2, 138, 142).

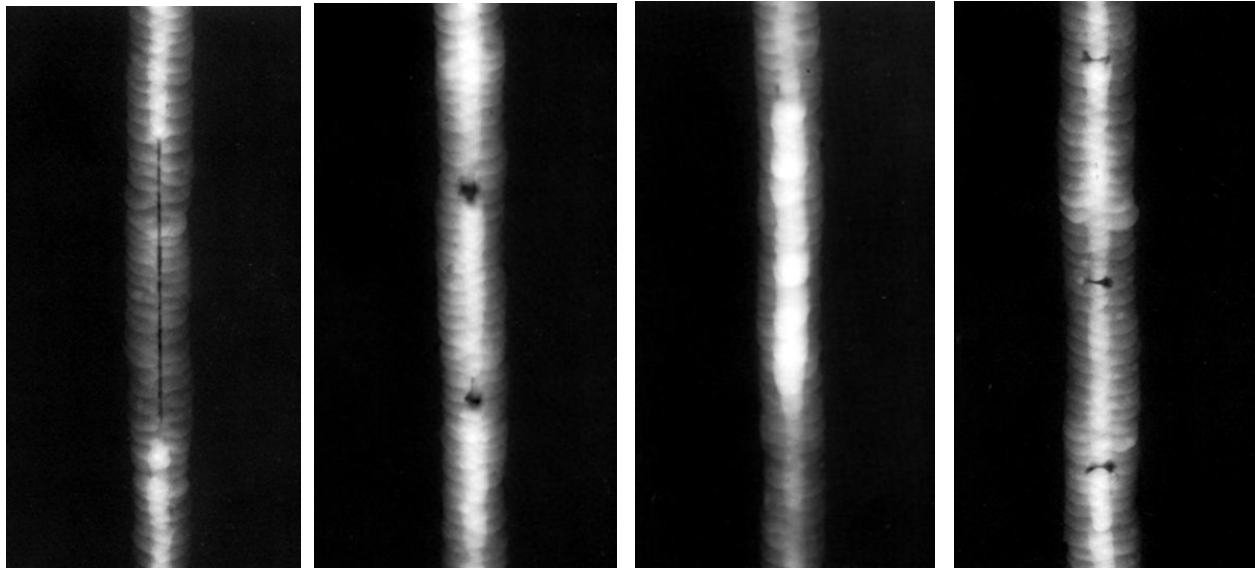
Las áreas de alta transmisión de radiación, o baja absorción, en la película revelada aparecen como áreas negras. Las áreas de baja transmisión de radiación, o alta absorción, en las películas reveladas aparecen como áreas claras. El área de menor espesor del objeto de ensayo produce un área más oscura en la película debido a que se transmite más radiación a la película. El área de mayor espesor del objeto de ensayo produce el área más clara porque el objeto absorbe más radiación y se transmite menos (2, 3, 4). La radiación impacta la emulsión fotográfica del mismo modo que lo hace la luz, en donde la absorción de la radiación va a depender de la densidad y masa atómica del material inspeccionado, ya que cuanto menor sea la masa atómica del material, más transparente será a la radiación, la cual tiene una longitud de onda determinada. El principio físico en el que se basa esta técnica es la interacción entre la materia y la radiación electromagnética, siendo esta última de una longitud de onda muy corta y de alta energía. Durante la exposición radiográfica, la energía de los rayos X o gamma es absorbida o atenuada al atravesar un material. Esta atenuación es proporcional a la densidad, espesor y configuración del material inspeccionado, lo anterior hace que este ensayo sea muy versátil y puede ser usado para inspeccionar casi todos los materiales de ingeniería (2, 138, 142). La radiografía industrial, es entonces usada para detectar características de una región de un determinado material, comparada con una región cercana, en donde grandes diferencias del material son fácilmente detectadas. La radiografía puede detectar solamente aquellas discontinuidades

diferentes de una región que presente una variación en el espesor, en el plano paralelo a la dirección del haz de radiación. Esto quiere decir que la capacidad del proceso de detectar discontinuidades con varios espesores en planos perpendiculares al haz, como fisuras, dependerá mucho de la técnica de prueba realizada. Discontinuidades como poros e inclusiones metálicas y no metálicas, además de fisuras y faltas de fusión, alineadas en forma favorable, que presenten un espesor variable en todas las direcciones, serán fácilmente detectadas siempre que no sean muy pequeñas en relación con el espesor de la pieza. En general, variaciones que presentan el 2 % o más de la variación de absorción en relación al espesor total, podrán ser detectadas (2, 138).

Las porosidades producen áreas oscuras en la película debido a que representan una pérdida significativa de densidad del material y las inclusiones metálicas producen áreas claras en la película si tienen mayor densidad que el material a inspeccionar. Por ejemplo, las inclusiones de tungsteno en las soldaduras, aparecen en la película como áreas muy claras, ya que la densidad del tungsteno es mayor. Las inclusiones no metálicas como escoria, producen frecuentemente áreas oscuras en la película; sin embargo, algunos electrodos contienen revestimientos que producen escoria de una densidad similar a la del metal de soldadura depositado y la escoria producida por ellos es muy difícil de encontrar e interpretar. Las discontinuidades superficiales también aparecerán en la película; sin embargo, no se recomienda el uso de este ensayo, debido a que la inspección visual es mucho más económica. Algunas de estas discontinuidades son la socavación, excesivo sobreespesor de refuerzo, falta de fusión, y sobreespesor de raíz por penetración (2, 3, 138). En la figura 16.7, se observan cuatro radiografías realizadas a cordones de soldadura donde se identifican algunas de las discontinuidades más comunes.

La radiación de baja energía se da en forma de radiación gamma o rayos X. La principal diferencia entre estas dos técnicas es el origen de la radiación electromagnética; ya que, mientras los rayos X son generados por un alto potencial eléctrico, los rayos gamma se producen por desintegración espontánea de materiales radioactivos, en donde las fuentes radioactivas más comunes son el Iridio 192, tulio 170, Cesio 137 y Cobalto 60. Los rayos X

son generados por dispositivos electrónicos y los rayos gamma por fuentes radioactivas naturales o por isótopos radioactivos artificiales, en donde estas fuentes de radiación emiten de forma constante y deben mantenerse en un contenedor de almacenamiento protegido, conocido como “cámara gamma”, cuando no está en uso. Estos contenedores frecuentemente emplean protecciones de plomo y acero (2, 3).



a. Falta de penetración b. Quemones c. Penetración excesiva d. Inclusión de escoria
Figura 16.7. Radiografías de algunas de las discontinuidades más comunes en los cordones de soldadura (2, 8)

Los rayos X están constituidos por fotones, que en su proceso de interacción con la materia producen efectos ionizantes, en donde la fuente de rayos X es el ánodo en un tubo eléctrico de alto voltaje. Cuando los rayos X son fabricados artificialmente, se hace pasar una corriente eléctrica (Baja corriente, alto voltaje) a través del filamento de tungsteno, el cual se calienta y empieza a brillar, generando una nube de electrones agrupados alrededor del filamento, que con la aplicación de un alto diferencial de potencial entre el filamento y el blanco metálico, hace que se aceleren los electrones y que éstos choquen contra el blanco, produciendo los rayos X en todas direcciones, con cierta longitud de onda, dependiente de la energía de los electrones. La capa de blindaje alrededor del tubo absorbe los rayos X, excepto aquellos que escapan a través de un orificio o ventana que existe para tal fin. Los rayos que pasan por la ventana, se emplean para producir la radiografía. La cantidad total

de radiación emitida por un tubo de rayos X, trabajando en determinadas condiciones de intensidad y tensión de excitación, es directamente proporcional al tiempo de exposición. Cuando se apaga el equipo de rayos X, la radiación cesa y la pieza inspeccionada no conserva radioactividad. Aunque existen arreglos especiales, diseñados para casos determinados, el equipo que se emplea con más frecuencia para la inspección radiográfica es el siguiente: (2)

- * Fuente de radiación (rayos X o rayos gamma).
- * Controles de la fuente. Película radiográfica.
- * Porta películas, hermético a la luz.
- * Pantallas intensificadoras.
- * Indicadores de calidad de la imagen.
- * Accesorios como letras de plomo para identificar el objeto de ensayo.

Antes de empezar a interpretar y evaluar las radiografías hay que revisar que estén libres de daños mecánicos, químicos y otras manchas que puedan enmascarar los resultados y puedan ser confundidas con imágenes de discontinuidades en el área de interés. Las marcas que deben evitarse son el velado, las ralladuras, las manchas de agua o con químicos, los rasguños, marcas dactilares y marcas de polvos, lo anterior puede producir indicaciones falsas debido a placas defectuosas. También se debe monitorear parámetros como la densidad radiográfica, marcas de localización, indicadores de calidad de imagen, sensibilidad radiográfica y calidad radiográfica. Para la realización de la radiografía, el radiólogo debe determinar el tipo de fuente e intensidad del ensayo, así como la distancia apropiada de colocación entre la película, el objeto y la fuente. En primer lugar se selecciona una fuente o intensidad en función del material y espesor que se desea radiografiar (2). A partir de la calidad necesaria requerida y de la penumbra máxima admisible, se determina la distancia foco-película. Posteriormente se determina el tiempo de exposición. Después de tomada la radiografía y que la película ha sido sensibilizada se procede a su revelado, el cual hace que precipite la plata contenida en el haluro sensibilizado. Las zonas de la emulsión que hayan recibido más radiación, tendrán mayor proporción de granos sensibilizados por unidad de superficie y después de revelado, esta

zona resultará más oscura por la mayor cantidad de plata liberada. Una cuestión importante, que de momento no se ha mencionado, y que afecta considerablemente la calidad de la imagen obtenida es el efecto de la radiación secundaria. Esta consiste en que la radiación que incide sobre el material, hace que este emita una segunda radiación secundaria o difusa, que produce velo uniforme sobre la película radiográfica, reduciendo el contraste y la definición. Para evitar este fenómeno se utilizan pantallas que permitan atrapar esta radiación, como es el caso de las pantallas de plomo, de un espesor tal que no sea un obstáculo para la radiación primaria (2, 138).

Para medir la sensibilidad del ensayo radiográfico se sitúan los penetrámetros o indicadores de la calidad de imagen (ICI) en inglés (IQI). Existen una gran diversidad de indicadores de calidad de imagen entre los que destacan los indicadores tipo hilo o los indicadores tipo hueco. Ambos tipos están especificados por tipo de material; además, los de tipo hueco tendrán espesor especificado e incluyen agujeros de distinto tamaño, mientras que los alambres tendrán diámetros especificados. La sensibilidad se verifica por la habilidad de detectar una diferencia dada en densidad debido al espesor del ICI o el diámetro del agujero, o el diámetro del alambre. El indicador de calidad se sitúa sobre la pieza durante la realización de la radiografía y posteriormente el diámetro del hilo más fino que se observe, se utiliza para cuantificar el defecto mínimo que detectarse, esto es, la sensibilidad del ensayo. La interpretación de películas debe realizarse por personal certificado como mínimo con Nivel II por SNT TC-1A de ASNT. Se requieren muchas horas de entrenamiento en seguridad sobre radiación para garantizar la seguridad, tanto del personal que realiza el ensayo radiográfico como de otro personal en la vecindad del ensayo. Por esta razón, el ensayo se debe realizar sólo después que se evacuó el área de ensayo, aunque pueda presentar problemas de cronograma (2).

Ventajas de la radiografía industrial:

- Su uso se extiende a casi todo tipo de materiales.
- Se obtiene una imagen visual del interior del material.

- Se obtiene un registro permanente inviolable de la inspección, si se almacenan apropiadamente las películas reveladas lejos de calor y luz excesivos.
- Pueden detectarse discontinuidades por debajo de la superficie de los metales.
- Se detectan errores de fabricación y ayuda a establecer las acciones correctivas.
- La dirección del haz no es afectada por la geometría de la pieza.
- No requiere patrón de calibración.
- Apto para utilización en campo.
- Se puede automatizar.

Limitaciones de la radiografía industrial:

- No es recomendable utilizarla en piezas de geometría complicada.
- No debe emplearse cuando la orientación de la radiación sobre el objeto sea inoperante, ya que no es posible obtener una definición correcta.
- La orientación de las discontinuidades planares es importante para su detección.
- La pieza de inspección debe tener acceso al menos por dos lados (un lado para la fuente y el opuesto para la película).
- Su empleo requiere el cumplimiento de estrictas medidas de seguridad.
- Peligro de irradiación y por eso se requiere un equipo de monitoreo de la radiación.
- Requiere personal altamente capacitado, calificado y con experiencia.
- Los equipos de ensayos radiográficos pueden ser muy caros.
- Requiere de instalaciones especiales como son: el área de exposición, equipo de seguridad y un cuarto oscuro para el proceso de revelado.
- Las discontinuidades de tipo laminar no pueden ser detectadas por este método.
- No indica la profundidad del defecto.

16.5. Evaluación por corrientes de Eddy

Este ensayo no destructivo se basa en los principios de la inducción electromagnética por la interacción entre el material y un campo electromagnético, esto ocurre cuando la corriente alterna fluye a través de una bobina conductora, produciendo un campo electromagnético.

Si se coloca un material conductor cerca o dentro de la bobina, el campo de la bobina inducirá corrientes de Eddy y campos electromagnéticos adicionales en la muestra, estas corrientes a su vez interactuarán con el campo original de la bobina y con la medida del efecto de la muestra sobre la bobina se podrán detectar cambios en conductividad eléctrica o en permeabilidad magnética de la muestra, generados por diferencias en la composición, microestructura y propiedades fisicoquímicas, ya que las discontinuidades de la muestra alterarán los campos electromagnéticos y de esta forma es posible detectar defectos potencialmente dañinos. El flujo de corriente en la bobina produce un campo magnético alrededor de ésta, el cual es conocido como campo primario. Cuando un objeto de prueba, eléctricamente conductor, es colocado en el campo primario, una corriente eléctrica será inducida en el objeto. Estas corrientes de Eddy, son corrientes eléctricas circulantes inducidas por un campo magnético alterno en un conductor aislado. También se le conocen como corrientes parásitas o corrientes de Foucault. En un material aislante no se induce las corrientes de Eddy, sin embargo, el campo magnético de la bobina atraviesa dicho material no conductor. El campo producido en la bobina es directamente proporcional a la magnitud de la corriente aplicada, a la frecuencia y a los parámetros de la bobina como: (2)

- Inductancia.
- Diámetro.
- Longitud.
- Espesor (ancho de la bobina).
- Número de vueltas del alambre.
- Metal del núcleo de la bobina.

Mediante esta prueba es posible identificar o diferenciar entre una amplia variedad de condiciones físicas, estructurales y metalúrgicas en partes metálicas ferromagnéticas y no ferromagnéticas, y en partes no metálicas que sean eléctricamente conductoras, como también detectar cambios en las dimensiones o en el espesor de los recubrimientos de una muestra. En la figura 16.8, se observa esquemáticamente como se generan los campos magnéticos para la inspección por corrientes de Eddy (2).

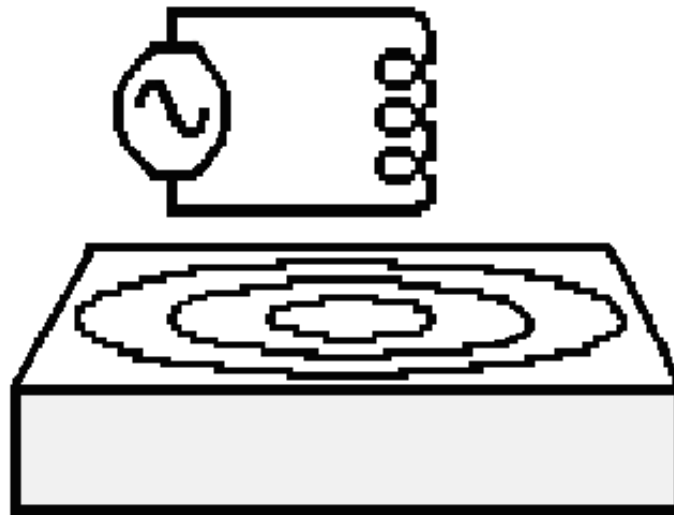


Figura 16.8. Esquema de generación de los campos magnéticos para la inspección por corrientes de Eddy (2)

Las pruebas con corrientes de Eddy, al igual que la inspección con partículas magnéticas, son más adecuadas para detectar defectos cerca de la superficie de una muestra. Particularmente a altas frecuencias, las corrientes de Eddy no penetran profundamente debajo de la superficie. La prueba con corrientes de Eddy es particularmente rápida en comparación con la mayor parte de las demás técnicas de pruebas no destructivas. Por tanto, gran cantidad de piezas pueden probarse rápida y económicamente. A menudo la prueba con corriente de Eddy se toma como una prueba de "Pasa o No Pasa" estandarizada con piezas en buen estado. Si la interacción entre bobina y pieza es la misma que cuando se prueban otras muestras, se puede suponer que éstas son de buena calidad (2).

Las principales aplicaciones de esta técnica son para medir o identificar condiciones o propiedades tales como: conductividad eléctrica, permeabilidad magnética, tamaño de grano, condición de tratamiento térmico, profundidades de tratamientos superficiales, dureza, esfuerzos residuales y dimensiones físicas de los materiales. Detectar discontinuidades superficiales y subsuperficiales, como costuras, traslapes, grietas, porosidades, inclusiones, segregaciones, picaduras y corrosión, como también detectar irregularidades en la estructura del material. Medir espesores de un recubrimiento no

conductor sobre un metal conductor, o el espesor de un recubrimiento metálico no magnético sobre un metal magnético (2).

Ventajas:

- Se aplica a todos los materiales conductores.
- Alta velocidad de prueba.
- Medición exacta de la conductividad.
- Resultados inmediatos.
- Detección de discontinuidades muy pequeñas (0.0387 mm^2) o (0.00006 in^2).
- La mayoría de los equipos trabajan con baterías y son portátiles.
- La única unión entre el equipo y el artículo bajo inspección es un campo magnético, no existe posibilidad de dañar la pieza.

Limitaciones:

- Poca capacidad de penetración, está restringida a menos de 6 mm.
- En algunos casos es difícil realizar en metales ferromagnéticos.
- Se aplica a todas las superficies con formas uniformes y regulares.
- Los procedimientos son aplicables únicamente a materiales conductores.
- No se puede identificar claramente la naturaleza específica de las discontinuidades.
- Se requiere personal calificado para realizar la prueba.

17. GENERALIDADES DE LAS ESTRUCTURAS METÁLICAS

Una estructura es un conjunto de partes unidas entre sí que forman un cuerpo el cual soporta los efectos de las fuerzas que actúan sobre él. Las estructuras metálicas son conformadas en su gran mayoría por elementos o partes de metal, generalmente cuando la estructura está compuesta de acero en un 80 % o superior, se le puede llamar estructura de acero. Las estructuras metálicas se utilizan porque tienen excelentes propiedades en la construcción, son muy funcionales y su coste de producción suele ser más barato o similar a otro tipo de estructuras. Las estructuras deben ser rígidas, o sea que no se deformen al aplicar fuerzas sobre ella, además deben ser estables y resistentes, es decir, que al aplicar una fuerza a cada uno de los elementos, sean capaces de soportar la fuerza sin deformarse, romperse o volcarse. Las fuerzas o cargas que soportan las estructuras se van repartiendo por los diferentes elementos de la estructura, pero las cargas siempre van a ir a parar al mismo sitio, a los cimientos o zapatas. Las estructuras metálicas están conformadas por la estructura metálica principal y la estructura metálica secundaria. La estructura metálica principal se compone de todos aquellos elementos que estabilizan y transfieren las cargas a los cimientos (que normalmente son de hormigón reforzado). La estructura metálica principal es la que asegura que no se vuelque, que sea resistente y que no se deforme. La estructura metálica secundaria corresponde fundamentalmente a la fachada y a la cubierta, lo que llamamos también subestructura y se coloca sobre la estructura metálica principal, y ésta puede ser metálica o de hormigón. Las estructuras metálicas se unen por soldadura o por tornillo de acuerdo al tipo de conexión de los elementos ensamblados, ya que se pueden tener conexiones rígidas, semirrígidas y flexibles, debido a que algunas veces se necesita que la conexión sea desmontada, que gire o se deslice entre otras. En las uniones de las estructuras metálicas suelen ser necesarias otras piezas para la transferencia de fuerzas, como cartelas y casquillos entre otras (147-150). La edificación de estructuras metálicas están constituidas por diferentes tipos de elementos y cada uno de estos elementos debe

estar convenientemente unido a las piezas vecinas de la estructura. Esto implica la utilización de distintos tipos de uniones. Los principales tipos son: (150)

- i) Los que se producen cuando tiene lugar un cambio de dirección, por ejemplo en las uniones viga-pilar, viga-viga y uniones entre barras en las cerchas.
- ii) Los que se requieren para asegurar tamaños manejables de la estructura de acero a efectos de transporte y montaje; los pilares, por ejemplo, se suelen empalmar cada dos o tres pisos.
- iii) Los que se producen cuando tiene lugar un cambio de componente, lo que incluye la unión de la estructura de acero a otras piezas del edificio, como pueden ser bases del pilar, uniones a núcleos de hormigón y uniones con paredes, forjados y cubiertas.

Las uniones son partes importantes de cualquier estructura metálica. Las propiedades mecánicas de las uniones influyen mucho en la resistencia, rigidez y estabilidad de la estructura en conjunto. El número de uniones y su complejidad tienen una influencia decisiva en el tiempo necesario para el análisis estático y el trazado de planos (150). La figura 17.1 muestra algunos ejemplos en uniones viga-pilar.

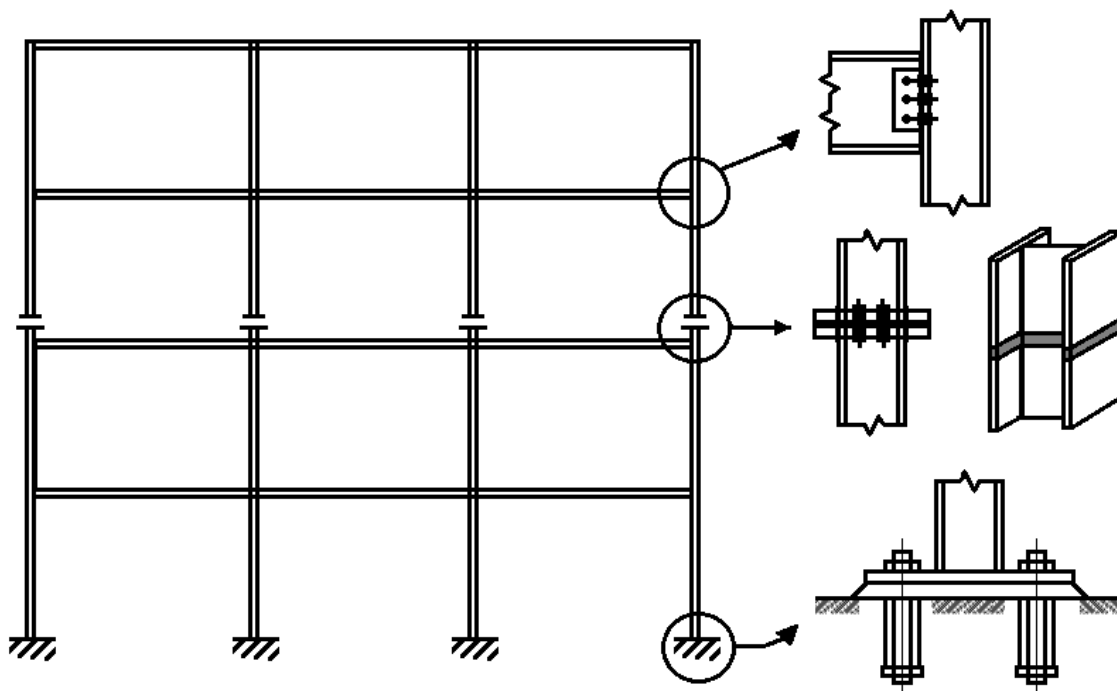


Figura 17.1. Esquemas en uniones viga-pilar (150)

En la fabricación de uniones se realizan operaciones de corte, taladrado y soldadura de barras, cartelas, casquillos y rigidizadores, que representan una gran parte del trabajo en el taller. La facilidad con que puedan efectuarse las uniones en la obra es un factor clave en el montaje. Por ello, la selección de las uniones y el detalle de cada una de ellas, tienen una influencia muy significativa en los costes de un edificio. Para resolver un cierto desajuste entre las distancias de los taladros y los diámetros de los tornillos, los agujeros se taladran normalmente con un diámetro 2 mm más grande que el del tornillo. Cuando no pueden permitirse los desplazamientos debidos a estas tolerancias, los tornillos pueden pretensarse para evitar el deslizamiento. En las estructuras solicitadas estáticamente, como los edificios, deberían evitarse los tornillos pretensados, ya que los métodos de apriete y el tratamiento especial que hay que dar a las superficies de contacto para obtener un valor del coeficiente de rozamiento adecuado y fiable son costosos. Según el perfil de la unión y la situación de los tornillos, están sujetos a tracción, a cortadura o a una combinación de ambas, tal como se ilustra en la figura 17.2. (150).

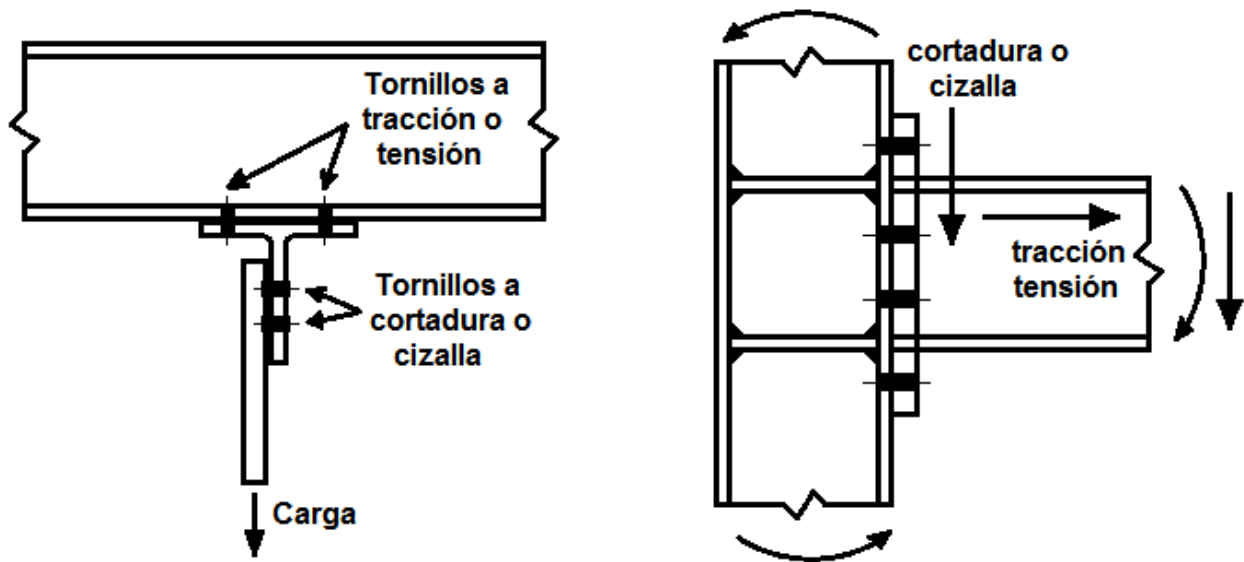
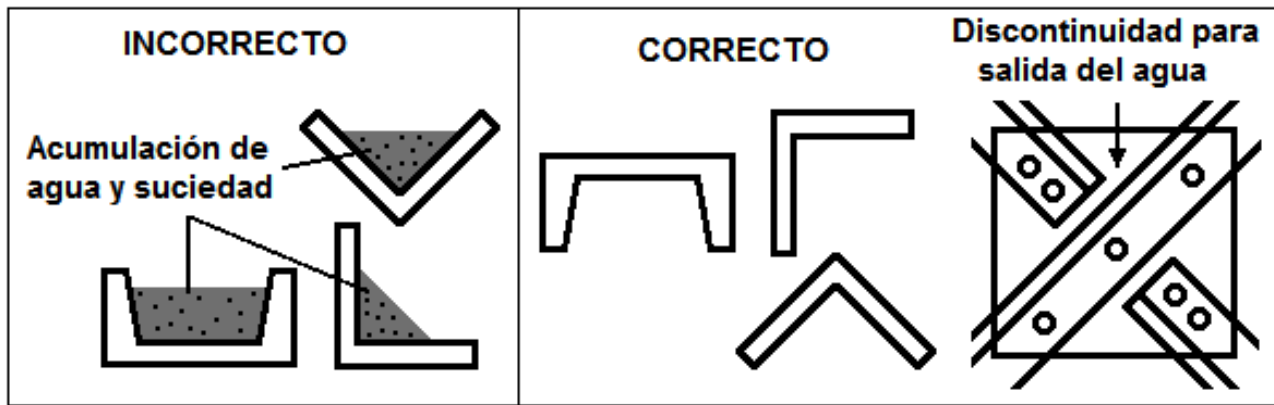


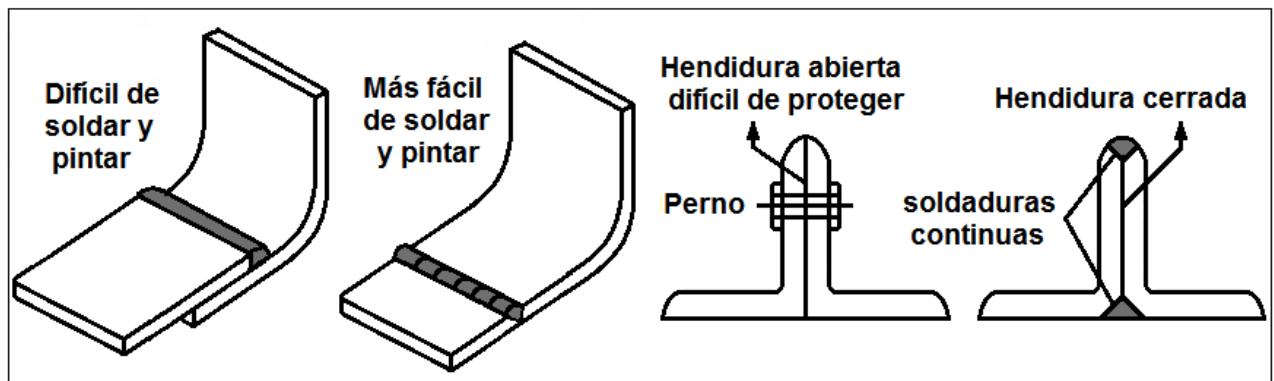
Figura 17.2. Tornillos, están sujetos a tracción, cizalla o una combinación (150)

Para resolver con acierto la estabilidad industrial de un edificio, es imprescindible entender el funcionamiento de su estructura, conocer la disposición estructural, las solicitaciones que le llegan y el material utilizado, con el fin de elegir los detalles y disposiciones constructivas más adecuados, así como resolver los puntos singulares de la misma. Las

construcciones ejecutadas con estructuras metálicas permiten mayores luces, siendo muy importante para locales comerciales, industrias, edificios sin pilares intermedios, así como para edificios de grandes alturas, sin pilares excesivamente gruesos, aumentando el espacio libre, en general las estructuras metálicas pesan poco y tienen elevada resistencia mecánica. Las estructuras metálicas avisan antes de producir un fallo definitivo, ya que permiten grandes deformaciones, además el material es homogéneo y reduce la posibilidad de fallos humanos en comparación con estructuras construidas con otros materiales. Las estructuras metálicas se construyen más rápido, ya que una parte de la estructura puede montarse en el taller. Asimismo tienen resistencia completa desde el instante de su colocación en obra. En la construcción de las estructuras metálicas se tienen que tomar algunas precauciones, ya que necesitan dispositivos adicionales para conseguir la rigidez como diagonales, nudos rígidos, pantallas entre otros. La elevada resistencia mecánica del material origina problemas de esbeltez; además, es necesario proteger las estructuras metálicas de la corrosión y del fuego (147, 148). La durabilidad de una estructura de acero es su capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta, y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y sollicitaciones consideradas en el análisis estructural. Para conseguir la durabilidad adecuada será necesario seguir una estrategia que contemple todos los posibles mecanismos de degradación, adoptando medidas específicas en función de la agresividad a la que se encuentre sometido cada elemento. Se debe seleccionar formas geométricas y detalles que sean compatibles con la preparación de superficies, pintado, inspecciones y el mantenimiento, para lograr una adecuada durabilidad de la estructura. Evitar diseños estructurales que puedan aumentar la corrosión y reducir al mínimo el contacto directo entre el agua y el acero. Cuando la estructura presente interiores inaccesibles o elementos huecos, se deben proteger de manera efectiva contra la corrosión, siendo un método el uso de soldaduras continuas y cuando las medidas de protección normales no sean suficientes, se podrá recurrir a la disposición de sistemas especiales de protección como recubrimientos, tratamientos químicos, protección catódica entre otras (147, 148). En la figura 17.3 se observan algunos problemas que se pueden generar en la construcción de estructuras metálicas.



a) Prevención en acumulación de agua y suciedad.



b) Realización de soldaduras y tratamientos de huecos.

Figura 17.3. Algunos problemas que se pueden generar en la construcción de estructuras metálicas (147)

17.1. Uniones en estructuras

En la construcción de una estructura metálica de varias plantas, se pueden tener varios tipos de uniones como uniones **viga a viga**, uniones **viga a pilar** (columna), **empalme de pilares** (columnas), **bases de pilar** (columna) y uniones a los **arriostramientos**. Naturalmente, esta lista no incluye las uniones entre el pórtico principal y otros elementos de la estructura, como, por ejemplo, vigas a forjado, los anclajes de los cerramientos, etc. A pesar de las distintas configuraciones geométricas y los requisitos estructurales característicos de las uniones presentadas, existen requisitos funcionales generales que se deben tener en cuenta, ya que las uniones deben ser lo suficientemente resistentes como para transmitir las cargas previstas y para conseguirlo, deben realizarse de forma segura y que se transmitan los

esfuerzos de una barra a otra a lo largo de trayectorias de carga, de manera uniforme para evitar concentraciones importantes de tensión; además, deben tener el grado de rigidez previsto y los elementos de la unión (chapas o casquillos) deben colocarse de forma que, en lo posible, se posicionen automáticamente y que sean accesibles para la reparación, así como que proporcionen un buen ajuste. Durante el diseño del proyecto se pueden escoger diferentes tipos de unión, en donde se deben tener en cuenta sus propiedades como la resistencia, rigidez y capacidad de deformación (150). En la figura 17.4 se observan perfiles usados en la construcción de estructuras metálicas.

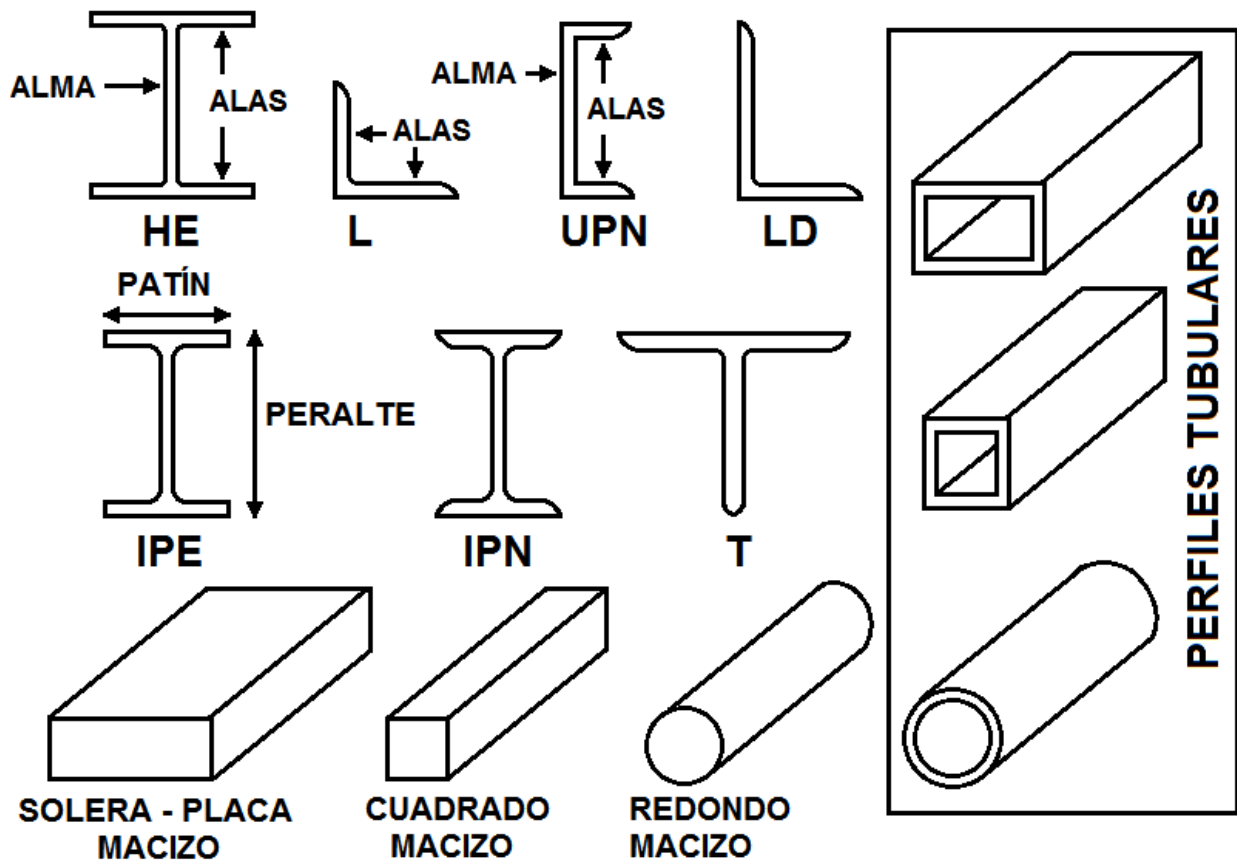


Figura 17.4. Perfiles usados en la construcción de estructuras metálicas

En la figura 17.5a se observan empalmes de pilares por medio de soldadura. En los casos en que las chapas tengan espesores distintos, pueden efectuarse soldaduras en ángulo, más baratas. Hay que recordar aquí que quizás la soldadura no sea el medio de unión más adecuado para las uniones de obra. En la figura 17.5b se observa un empalme atornillado. Puede suponerse que las fuerzas verticales se transmiten bien por apoyo directo, o bien a

través de las **platabandas**. Las **platabandas** sirven también para transmitir los momentos flectores y los esfuerzos cortantes. Cuando existen espesores distintos de alas/almas, se requieren forros. En la figura 17.5c se observa un empalme utilizado con frecuencia. Puede que las chapas no sean perfectamente planas, debido a la soldadura en el taller. Normalmente no hace falta ningún mecanizado posterior para aplanar estas chapas. En la figura 17.5d se observa un empalme que algunas veces es más fácil hacer que la viga sea continua. Para transmitir las cargas y por razones de estabilidad, hay que rigidizar la viga entre las alas del pilar (150).

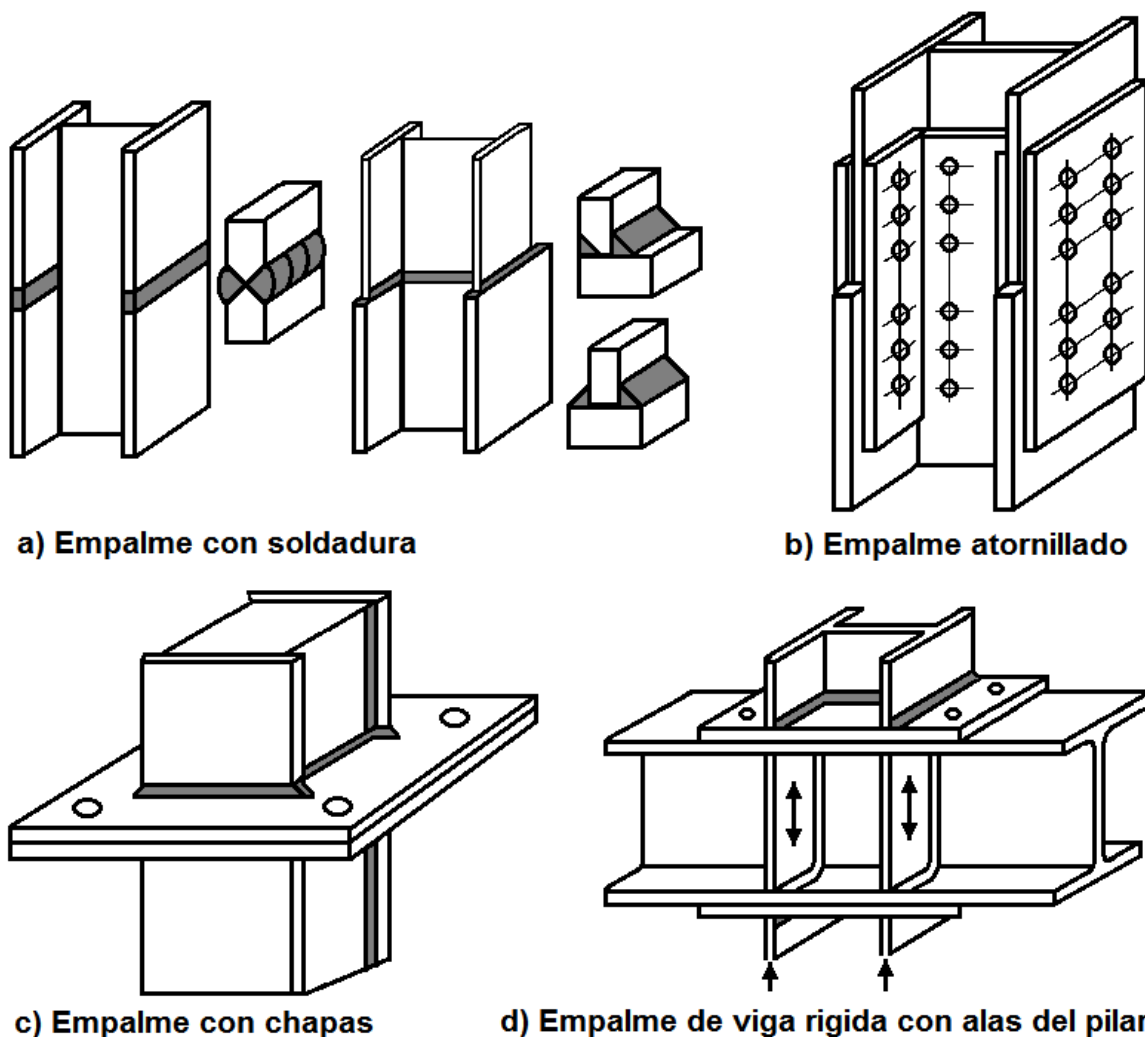


Figura 17.5. Empalmes de pilares o columnas (150)

Las uniones dentro del sistema de arriostramiento, o entre éste sistema y la estructura principal de pórticos, tienen que transferir fuerzas entre varias barras de distinta

orientación. Como el arriostramiento triangulado se ha diseñado partiendo de que cada barra únicamente soporta esfuerzos axiales (además de cualquier pequeña flexión debida a la falta de coincidencia del eje baricéntrico), el requisito de diseño para las uniones de arriostramiento es esencialmente la transferencia de fuerzas directas entre varias barras de distinta orientación. La figura 17.6 ilustra cuatro disposiciones básicas: el tipo A une el arriostramiento a la estructura principal, y el tipo B es una conexión interna del arriostramiento. Los tipos C y D combinan las dos funciones haciendo que las barras sean parte del sistema de arriostramiento (150).

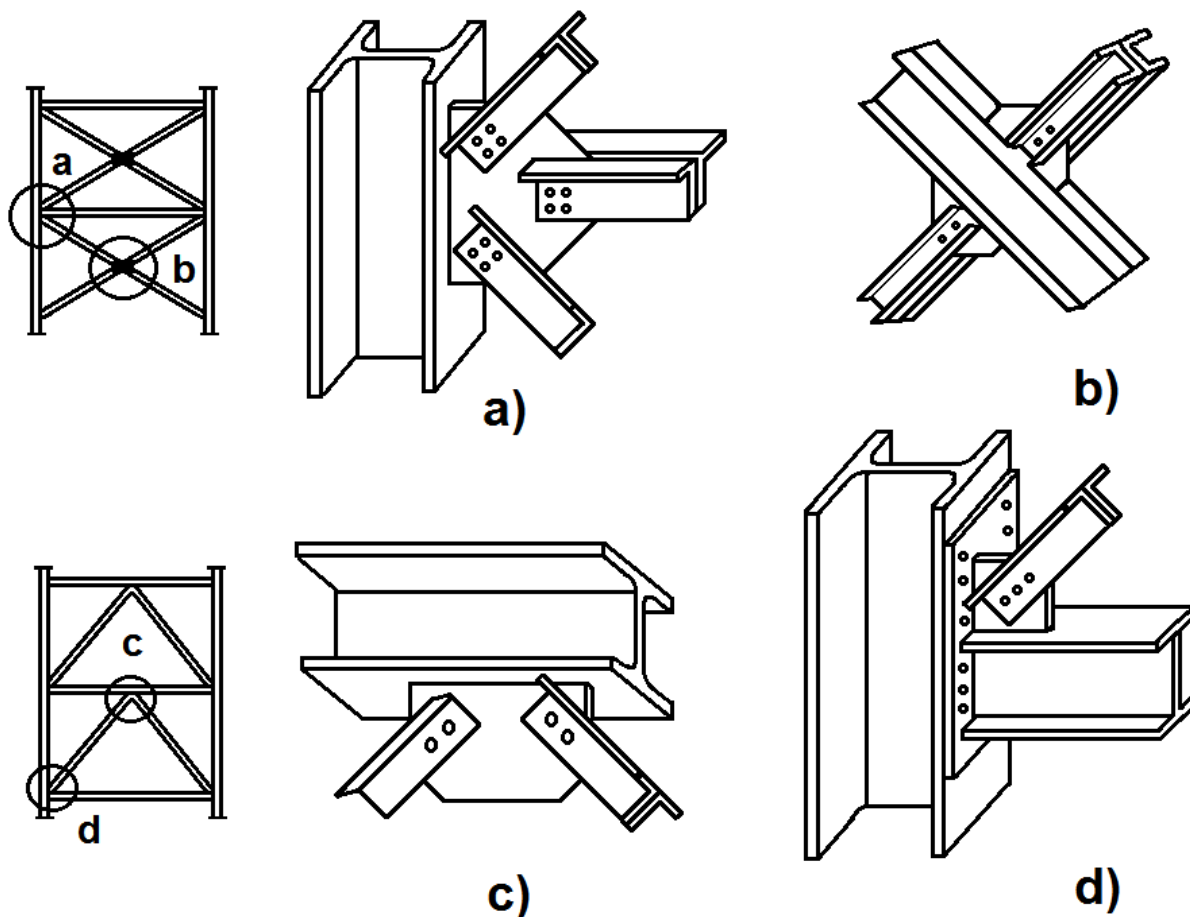


Figura 17.6. Esquemas de cuatro disposiciones básicas de arriostramiento (150)

Cuando las condiciones de trabajo son favorables, la soldadura es la forma más económica de efectuar uniones. Por eso, las uniones efectuadas en el taller son normalmente soldadas. Cuando hace falta efectuar uniones en la obra (montaje) generalmente se atornillan, pero es frecuente que estas uniones se preparen en el taller soldando las chapas, etc. que se

necesitan en una unión atornillada. En las construcciones soldadas para edificación, aproximadamente el 80 % de las soldaduras son en ángulo y el 15 % soldaduras a tope. El 5 % restante son soldaduras de tapón, de ranura y por puntos. En el cálculo de la soldadura se efectúan tres hipótesis fundamentales como que los cordones son elementos homogéneos e isotrópicos; que las piezas conectadas mediante los cordones son rígidas y sus deformaciones despreciables y que sólo se consideran tensiones nominales debidas a cargas externas. Los efectos de las tensiones residuales, concentración de tensiones y perfil de los cordones no se tienen en cuenta en el cálculo. Estas hipótesis conducen a una distribución uniforme de las tensiones en la soldadura, mientras que en la realidad se observan variaciones en las tensiones y las deformaciones a lo largo del cordón. De hecho, la concentración de tensiones y tensión residual pueden alcanzar localmente el límite elástico. Sin embargo, la ductilidad del material permite una redistribución de las tensiones a lo largo de la longitud del cordón, produciendo una reducción apreciable en la magnitud de los picos de tensión. Esta redistribución también tiene lugar cuando el cordón está sujeto a la acción de cargas externas. Según la teoría de la plasticidad, la distribución final de las tensiones será óptima cuando se alcance la tensión de fluencia en toda la longitud del cordón (150).

La determinación de la distribución de los esfuerzos es la parte más difícil del procedimiento, porque implica necesariamente efectuar ciertas hipótesis simplificadas sobre el “modo de funcionamiento” de la unión, además que existe una gran variedad de tipos y formas de unión. Para tratarlas, es útil aplicar el concepto de mecanismos de transmisión de esfuerzos, que pueden encontrarse en los componentes de las uniones. Cada una de estas transmisiones de esfuerzos básicos puede tener diversos modos de agotamiento y se deben estudiar todos, además el elemento más débil determina la resistencia de la unión a la carga aplicada (150). En la figura 17.7 se observan ejemplos de transmisión de esfuerzos axiales en elementos solicitados a tracción o compresión. El control de calidad es una parte importante de la actividad industrial. El término calidad incluye todas las características de un producto que afectan a su capacidad para cumplir su función. Normalmente, todas las estructuras soldadas pasan algún tipo de inspección. El tipo y el alcance de la inspección, así como la elección de las soldaduras a inspeccionar, se

seleccionan según el pliego de condiciones del proyecto. El objetivo principal de esta inspección es descubrir los posibles defectos de soldadura como mordeduras a lo largo del borde, porosidad o inclusiones de gas, garganta insuficiente, penetración incompleta entre otros (150).

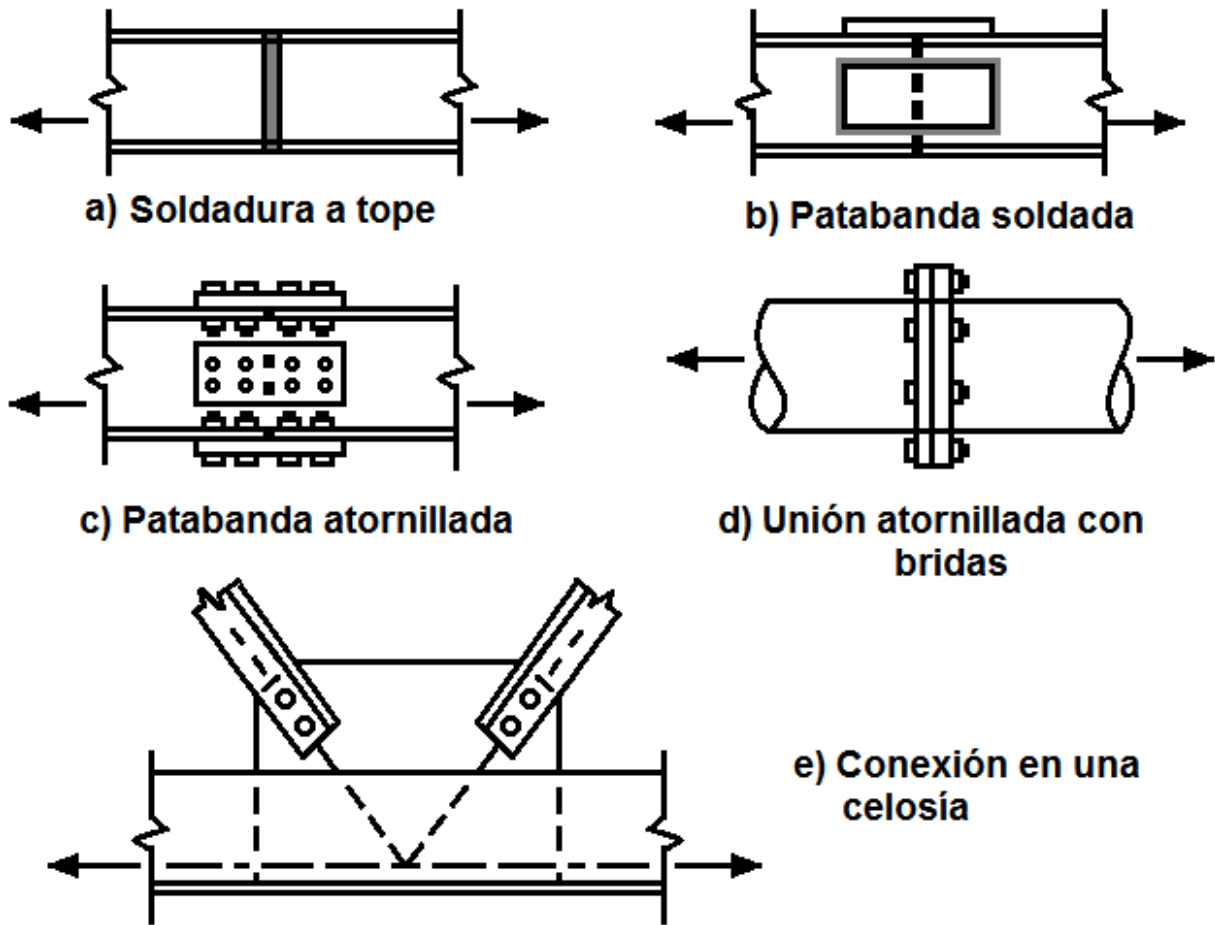


Figura 17.7. Ejemplos de transmisión de esfuerzos axiales en elementos solicitados a tracción o compresión (150)

17.2. Sistema de protección para estructuras metálicas

Finalizada la construcción de las estructuras metálicas pueden aparecer problemas por el efecto del calor, como consecuencia de incendios y/o por corrosión excesiva. Por lo anterior es necesario la protección contra incendios, ya que el acero se puede considerar que no resiste al fuego porque disminuye su resistencia a la tensión cuando pasa de 300 °C

y esta reducción de la resistencia a la tensión alcanza la mitad a 500 °C. Además, la dilatación térmica genera grandes deformaciones que pueden hacer colapsar la estructura. Para la protección de las piezas metálicas expuestas al fuego se emplean revestimientos con materiales no inflamables que retardan la propagación del calor al acero entre 1 y 3 horas, para que la estructura sea desalojada y que los bomberos puedan extinguir el incendio. La corrosión es el peor enemigo de las estructuras metálicas siendo agravado por soluciones salinas y ácidos diluidos como ocurre en ambientes marinos y/o industriales. La corrosión es la degradación del metal por una reacción electroquímica con su entorno. Para evitar o disminuir la corrosión se aplican revestimientos protectores, los cuales deben ser correctamente aplicados para que tengan un buen desempeño. Por lo anterior, es muy importante la preparación superficial, ya que debe tener una buena rugosidad y estar libre de grasa, suciedad, humedad, óxidos o cualquier tipo de incrustación. Cuando se aplican pinturas se debe definir el tipo de preparación superficial, así como el tipo y espesor de las capas imprimante (anticorrosivo), capas intermedias y capa de acabado (147, 148).

17.3. Análisis estructural

El análisis estructural consiste en la determinación del efecto de los esfuerzos sobre la totalidad o parte de la estructura, con objeto de efectuar las comprobaciones de los estados límites últimos y de servicio. El análisis estructural proporciona resultados a nivel global (reacciones, desplazamientos) y a nivel seccional (esfuerzos, curvaturas, elongaciones). Debe servir, también, para determinar el comportamiento a nivel local (tensiones, deformaciones) de aquellas zonas singulares como las zonas locales próximas a cargas concentradas, nudos, cambios bruscos de sección, etc. En elementos unidimensionales, las constantes estáticas a considerar son el área, los momentos de inercia respecto de ejes principales y el módulo de torsión uniforme. El área de cortante y los efectos de distorsión de la sección y de la torsión de alabeo sólo necesitan tenerse en cuenta en algunos casos especiales. Los efectos del arrastre por cortante y de la abolladura de paneles comprimidos de chapa, sobre la rigidez de los elementos deben considerarse cuando afecten significativamente a los resultados del análisis estructural (151).

Las condiciones que debe satisfacer todo análisis estructural son las de equilibrio y de compatibilidad, teniendo en cuenta las leyes de comportamiento de los materiales. Los métodos para el análisis global de una estructura se clasifican en: **análisis lineales**, basados en las hipótesis de comportamiento elástico-lineal de los materiales constitutivos y en la consideración del equilibrio en la estructura sin deformar (análisis en primer orden). **Análisis no lineales**, que tienen en cuenta la no linealidad mecánica, esto es, el comportamiento no lineal de los materiales, y la no linealidad geométrica, es decir, la consideración de las condiciones de equilibrio sobre la estructura deformada (análisis en segundo orden). Los efectos de segundo orden, debidos a la deformación de la geometría de la estructura, deben tenerse en cuenta si aumentan significativamente los efectos de las acciones (esfuerzos y deformaciones) en la respuesta estructural. Para su evaluación se han de considerar las imperfecciones geométricas y mecánicas (151). En la figura 17.8 se observan algunas de las configuraciones de los nudos básicos en perfiles estructuras tubulares.

La clasificación de los nudos básicos que pueden aparecer en una estructura construida con perfiles tubulares, tales como en T (que incluye Y), X o K (que incluye N) no se basa, únicamente, en el aspecto físico del nudo, sino también, y fundamentalmente, en el método de transferencia de los esfuerzos en la unión. Cuando la componente normal del esfuerzo en una barra auxiliar se equilibra con el esfuerzo cortante (y la flexión) de la barra principal (a la que llamaremos cordón), el nudo se clasifica como nudo en T si la barra auxiliar es perpendicular al cordón y como nudo en Y en caso contrario. Cuando la componente normal del esfuerzo en una barra auxiliar se equilibra, al menos en gran medida (diferencias menores del 20 %), con la componente normal del esfuerzo en otra (u otras) barra auxiliar, situada en el mismo lado de la unión, el nudo se clasifica como nudo en K. La separación (espaciamiento “g”), se mide entre las barras auxiliares cuyas cargas se equilibran. Los nudos en N pueden considerarse como un tipo especial de nudo en K. Cuando la componente normal del esfuerzo se transmite a través del cordón y se equilibra con una (o varias) barra auxiliar situada en el lado opuesto de la unión, el nudo se clasifica como un

nudo en X. Cuando un nudo presenta barras auxiliares en más de un plano, el nudo se clasifica como un nudo espacial (151).

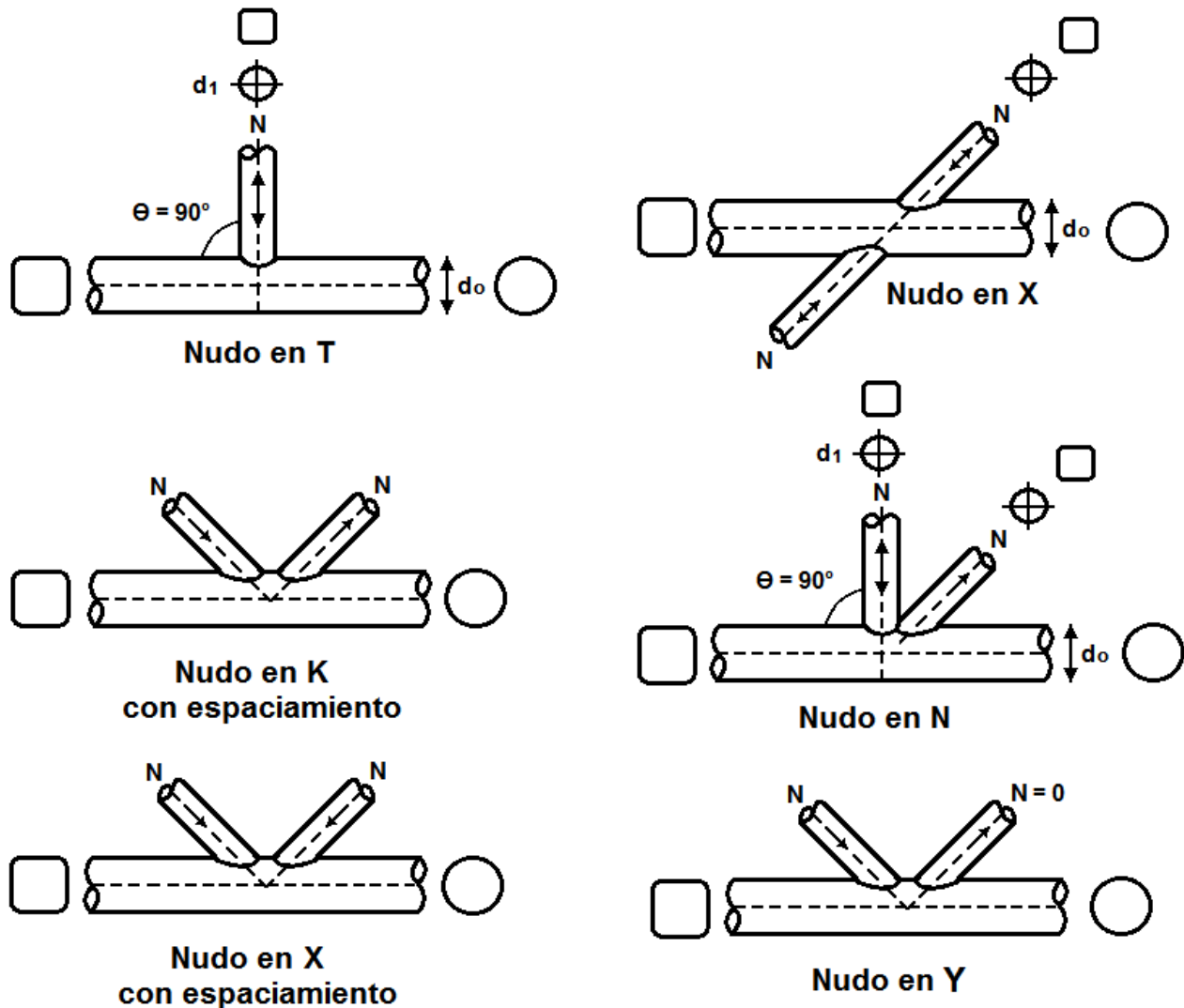


Figura 17.8. Algunos nudos básicos en perfiles estructuras tubulares (151)

17.4. Uniones Vierendeel

Se componen de elementos de cordón unidos a montantes que están casi siempre a 90° de los cordones. El principio de cálculo habitual en las vigas Vierendeel ha sido asumir la rigidez total de los nudos, pero esto rara vez sucede con uniones Vierendeel entre perfiles huecos de sección rectangular (RHS). A diferencia de las celosías tipo Warren o Pratt trianguladas, en las que las uniones se acercan a una condición de articulación en su estado

límite último y provocan que las barras auxiliares estén solicitadas por fuerzas predominantemente axiales, las uniones Vierendeel tienen montantes sometidos a momentos flectores importantes, así como a esfuerzos axiales y esfuerzos cortantes. Tanto la resistencia como la rigidez a flexión de una unión no reforzada disminuye al aumentar la relación b_0 / t_0 de esbeltez del cordón, y al disminuir la relación b_1 / b_0 (ó β) entre la anchura del montante y la del cordón. Las uniones con $\beta = 1,0$ y un valor bajo b_0 / t_0 se acercan a la rigidez total, pero todas las otras uniones no reforzadas pueden clasificarse como semirrígidas (151). En la figura 17.9 se observan la configuración de una unión Vierendeel.

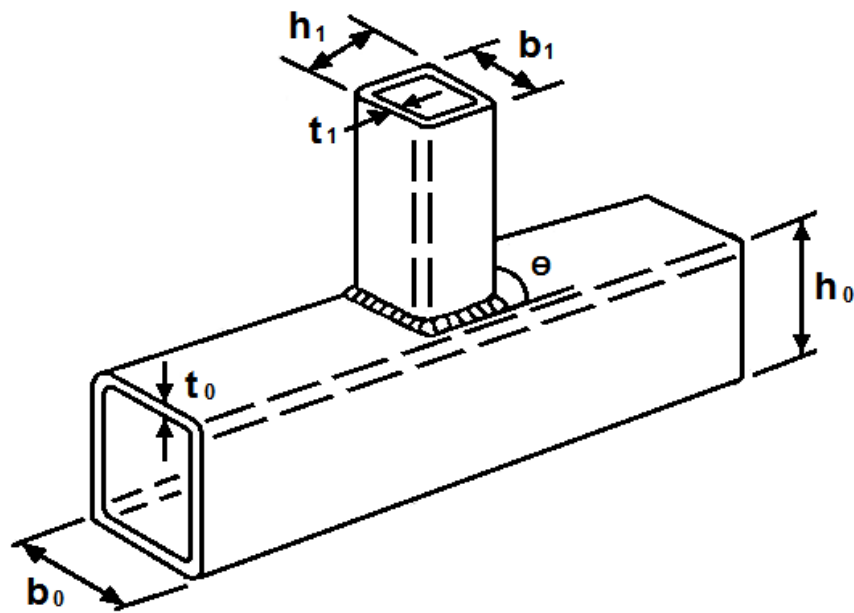


Figura 17.9. Configuración de una unión Vierendeel (151)

El acero tiene grandes ventajas en la construcción de estructuras, ya que soporta grandes esfuerzos, es rígido y tiene ductilidad o capacidad de deformación, haciendo que las estructuras en acero se comporten mucho mejor en terremotos que la estructuras hechas en otros materiales, lo cual hace que estas estructuras en acero casi nunca se derrumben. Una desventaja de las estructuras en acero es que pierden sus propiedades mecánicas a altas temperaturas, lo que debilita su comportamiento en incendios. La norma NSR 10 define el término acero estructural como los elementos de acero estructural esenciales para resistir las cargas de diseño. Esta norma también cubre las estructuras de aluminio, las cuales son fabricadas con aluminio estructural, siendo el aluminio estructural capaz de resistir las

cargas de diseño. Los metales empleados en estructuras son principalmente el acero ordinario, el acero auto patinable, el acero inoxidable y el aluminio. El acero es el material estructural por excelencia para grandes alturas, ya que soporta el peso con pilares de dimensiones reducidas, resiste el empuje ante el vuelco y evita movimientos debidos a la acción del viento. Los valores fundamentales para el diseño de las piezas de acero son el límite elástico y el límite de rotura, aunque hay otras características que son comunes para todos los aceros y que se deben tener en cuenta como el módulo de elasticidad, módulo de rigidez, coeficiente de Poisson, coeficiente de dilatación térmica y la densidad (147-149).

17.5. Introducción a la norma de sismo resistencia NSR 10 capítulo F

En el presente capítulo se dará algunas indicaciones de la norma de sismo resistencia NSR 10, capítulo F, para tener en cuenta en la ejecución de los proyectos de soldadura que involucren la fabricación de estructuras metálicas, ya que el alcance de esta norma es el diseño de estructuras conformadas por elementos de acero o aluminio, soldados, atornillados o remachados. Para una mejor comprensión de la norma NSR 10, se recomienda leerla con detenimiento para despejar las dudas que se puedan ocasionar en esta breve descripción de la norma (149). Los pliegos o especificaciones de los contratos determinan la metodología y la calidad del trabajo efectuado en las obras, ya que se especifican los requisitos de las estructuras metálicas y el nivel del sistema sísmico. Las exigencias dadas para la inspección de soldaduras por medio de métodos ensayos no destructivos según la NSR 10, se describen en el numeral F.2.14, F3.10 del título F y deben estar acorde con AWS D1.1 y AWS D1.8, además deben ser complementadas en los planos de diseño, las especificaciones o cuando el diseñador calculista del proyecto indiquen algo distinto para cada estructura.

El capítulo F.2. **Estructuras de acero con perfiles laminados, armados y tubulares estructurales**, comienza con las **provisiones generales (F.2.1)** donde dice que es aplicable al diseño de estructuras conformadas por elementos de acero estructural en cuya fabricación se utilicen perfiles laminados, perfiles armados o perfiles tubulares estructurales (PTE),

incluyendo sistemas donde el acero y el concreto actúen como una sección compuesta. Continúa con definiciones y nomenclatura, después sigue con los materiales que pueden ser usados bajo esta norma, en donde los certificados del productor constituyen suficiente evidencia de conformidad con los estándares que sean aplicables, y se debe tener en cuenta de hacer una buena selección del material de aporte y fundentes, de acuerdo con el material base y la aplicación prevista. Las provisiones generales terminan con los planos y especificaciones del diseño estructural (149). En la figura 17.10 se observa una estructura metálica.

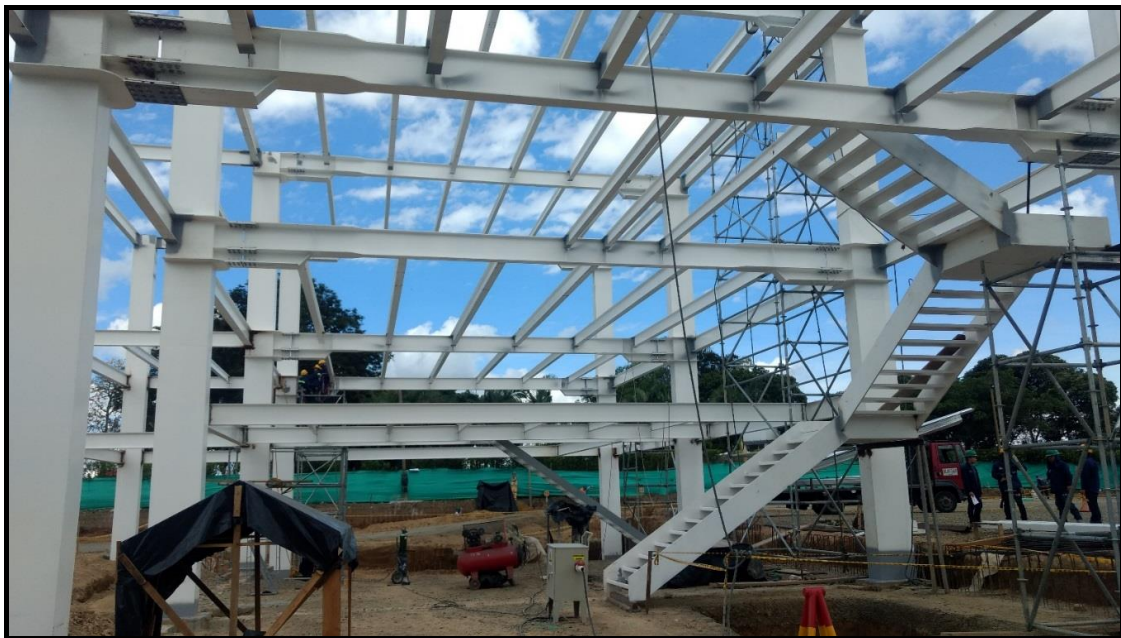


Figura 17.10. Estructura metálica

Los **requisitos de diseño (F.2.2)** contienen los requisitos generales para el análisis y diseño de estructuras de acero, aplicables a todos los numerales del Capítulo F.2; en las provisiones generales de este numeral está el diseño de los miembros y las conexiones que debe ser consistente con el comportamiento esperado del sistema estructural y con las suposiciones formuladas en el análisis estructural. Continúa con las cargas y combinaciones de carga, las cuales serán las aplicables al diseño para estados límites de resistencia según el Título B del presente reglamento; sigue con las bases para el diseño en cuanto a resistencia requerida de cada uno de los miembros y conexiones con base al análisis estructural para combinaciones de carga según las cargas y combinaciones de carga que

puede soportar cumpliendo el título B de este reglamento. Continúa con estados límites, en donde el diseño se basará en el principio de que ningún estado límite de resistencia o de servicio será excedido cuando la estructura sea sometida a cada una de las combinaciones de carga aplicables; sigue con el diseño para estados límites de resistencia en donde se considera que el diseño satisface los requisitos de este Capítulo cuando la resistencia de diseño de cada componente estructural es mayor o igual que la resistencia requerida calculada de acuerdo con el numeral F.2.2.3.1. En el diseño de conexiones, los elementos de conexión deben diseñarse de acuerdo con los requisitos de los numerales F.2.10 y F.2.11. Las fuerzas y deformaciones usadas en el diseño deben ser consistentes con el funcionamiento esperado de la conexión y con las suposiciones formuladas en el análisis estructural. Se admiten deformaciones auto limitadas en las conexiones. En sus puntos de apoyo, las vigas y armaduras deberán estar restringidas contra la rotación alrededor de su eje longitudinal, excepto cuando mediante análisis se puede demostrar que dicha restricción no es necesaria (149).

En las propiedades de los miembros esta la clasificación de las secciones para el pandeo local y clasifica a las secciones solicitadas a compresión en secciones con elementos esbeltos o sin elementos esbeltos y si la sección está solicitada a flexión se clasifican como compacta no compacta o con elementos esbeltos. En la fabricación, montaje y control de calidad, dice que los planos de taller, la fabricación, la pintura en planta y el montaje deben cumplir los requisitos estipulados en el numeral F.2.13, Fabricación y Montaje. El control de calidad y el aseguramiento de la calidad deben ajustarse a lo estipulado en el numeral F.2.14, control de calidad y aseguramiento de la calidad. Este numeral termina con la evaluación de estructuras existentes, en donde dice que los requisitos para la evaluación de estructuras existentes se presentan en el numeral F.2.19, evaluación de estructuras existentes (149).

El **diseño por estabilidad (F.2.3)** presenta los requisitos para el diseño de estructuras por estabilidad. El enfoque que aquí se presenta es el del método de análisis directo; en el numeral F.2.21 se presentan métodos alternativos. En este numeral están los requisitos

generales para el diseño por estabilidad, para asegurar la estabilidad de la estructura como un todo y para cada uno de los elementos. Este análisis considera las deformaciones por flexión, cortante y carga axial en los miembros y cualquier deformación que pueda contribuir al desplazamiento de la estructura; el efecto de las imperfecciones geométricas; la reducción de la rigidez de los miembros por efectos de comportamiento inelástico; y las incertidumbres en la rigidez y la resistencia. Se permite cualquier método racional de diseño por estabilidad que considere todos los factores enumerados arriba; incluyendo los métodos que se describen en los numerales F.2.3.1.1 y F.2.3.1.2. Para estructuras diseñadas con base en un análisis inelástico, se deben satisfacer las provisiones del numeral F.2.15. Además permite el diseño por estabilidad con cálculo de la resistencia requerida y cálculo de la resistencia disponible (149).

El **diseño de miembros a tensión (F.2.4)** se aplica a miembros solicitados por tensión axial causada por fuerzas estáticas que actúan a lo largo del eje centroidal. En este numeral están los límites de esbeltez, resistencia de diseño a tensión, área neta efectiva, miembros armados, miembros conectados con pasadores, barras de ojo. El **diseño de miembros a compresión (F.2.5)** se aplica a miembros solicitados por compresión axial a través del eje centroidal. En este numeral están las provisiones generales, longitud efectiva, pandeo por flexión de miembros sin elementos esbeltos, pandeo por torsión y pandeo por flexo-torsión de miembros sin elementos esbeltos, miembros en ángulo sencillo a compresión, miembros armados y miembros con elementos esbeltos. El **diseño de miembros a flexión (F.2.6)** se aplica a miembros solicitados por flexión simple con respecto a uno de sus ejes principales. Esta condición se da cuando las cargas actúan en un plano que es paralelo a uno de los ejes principales y dicho plano pasa por el centro de corte de la sección o, alternativamente, cuando el miembro está restringido contra la torsión en los puntos de aplicación de las cargas y en los apoyos. El **diseño de elementos por cortante (F.2.7)** se aplica al diseño del alma para miembros de simetría doble o simple sujetos a cortante en el plano del alma, al diseño a cortante de ángulos sencillos y perfiles tubulares estructurales (PTE), y al diseño para cortante en la dirección débil en perfiles de simetría doble o simple. El **diseño de miembros solicitados por fuerzas combinadas y por torsión (F.2.8)** se aplica a

miembros solicitados por carga axial y por flexión con respecto a uno o ambos ejes, con o sin torsión, y a miembros solicitados únicamente por torsión. El **diseño de miembros de sección compuesta (F.2.9)** se aplica a miembros compuestos, conformadas por perfiles laminados, perfiles armados o perfiles tubulares estructurales (PTE) que actúan conjuntamente con una sección de concreto estructural, y a vigas de acero que soportan una losa de concreto reforzado estando las vigas y la losa interconectadas de tal forma que actúan en conjunto para resistir la flexión. Se incluyen vigas compuestas simplemente apoyadas o continuas con conectores y vigas tipo perfil relleno o revestido de concreto, construidas con o sin apuntalamiento temporal (149).

El **Diseño de conexiones (F.2.10)** se aplica a los elementos de conexión, los conectores y los elementos afectados de los miembros conectados no sometidos a cargas de fatiga. En los **requisitos generales** dice que la resistencia requerida de las conexiones se determinará con base en un análisis estructural para las cargas de diseño especificadas, consistente con el tipo de construcción especificada, o se tomará como una proporción de la resistencia de diseño de los miembros conectados cuando así se especifique y cuando los ejes centroidales de los miembros cargados axialmente que se intersectan no coinciden en un punto, se deben considerar los efectos de la excentricidad. También dice de las condiciones de diseño de las conexiones simples, conexiones a momento y los empalmes en una sección pesada, entre otros requisitos generales. Finaliza diciendo que deben utilizarse juntas con pernos pretensionados o juntas soldadas para las siguientes conexiones: (149)

- (a) Empalmes de columnas en todas las estructuras de varios pisos con más de 38 m de altura.
- (b) Todas las conexiones de vigas y viguetas a columnas, y todas las conexiones entre vigas y viguetas de las cuales dependa el arriostramiento de las columnas, en estructuras de más de 38 m de altura.
- (c) En todas las estructuras que soporten puentes grúas de más de 50 kN de capacidad: empalmes en armaduras de cubierta y conexiones de armaduras a columnas, empalmes de columnas, arriostramientos de columnas, pie-de-amigos y apoyos del puente grúa.

(d) Conexiones para soportar maquinaria en movimiento u otras cargas vivas que produzcan impacto o inversión de esfuerzos. En otros casos y mientras no exista otra indicación, las conexiones pueden diseñarse usando pernos ASTM A307 o pernos de alta resistencia con apriete ajustado.

Continúa con **soldaduras** en donde dice que se debe cumplir todas las provisiones del código de soldadura estructural de la sociedad americana de soldadura, **AWS D1.1**, excepto que se aplicarán los siguientes requisitos del Capítulo F.2 en lugar de las secciones del código AWS correspondientes: (149)

- ✓ Numeral F.2.10.1.6 en lugar de AWS D1.1 — Sección 5.17.1
- ✓ Numeral F.2.10.2.2.1 en lugar de AWS D1.1 — Sección 2.3.2
- ✓ Tabla F.2.10.2-2 en lugar de AWS D1.1 — Tabla 2.1
- ✓ Tabla F.2.10.2-5 en lugar de AWS D1.1 — Tabla 2.3
- ✓ Tabla F.2.17-1 en lugar de AWS D1.1 — Tabla 2.4
- ✓ Números F.2.2.3.10 y F.2.17 en lugar de AWS D1.1 — Sección 2, Parte C
- ✓ Numeral F.2.13.2.2 en lugar de AWS D1.1 — Secciones 5.15.4.3 y 5.15.4.4

En este numeral se habla de soldaduras acanaladas, soldadura de filete, soldaduras tapo y de ranura, dando el concepto de área efectiva con sus limitaciones. También dice que la selección de los electrodos de acuerdo al metal base debe ajustarse al código AWS D1.1. (149). En la tabla 17.1 se observa la selección del metal del aporte según la tabla 3.1, del AWS D1.1.

Tabla 17.1. Selección del metal del aporte según material base (86, 103)

	Requerimientos de especificaciones de los aceros				Requerimientos de metales de aporte					
	Especificación de aceros ^{a,b}	Grado	Resistencia a la fluencia Ksi - Mpa	Resistencia de tensión Ksi	Proceso	Espe. AWS ^c	Clasificación electrodos ^g			
G r u p o 1	ASTM A 36 ^d		36 250	58 - 80	SMAW	A5.1	E60XX, E70XX			
	ASTM A 53	Grado A 5.5	35 240	60 min.		A5.5 ^f	E70XX-X			
	ASTM A 106	Grado B	35 240	60 min.		SAW	A5.17	F6XX-EXXX F6XX-ECXXX F7XX-EXXX F7XX-ECXXX		
	ASTM A 131	A,B,CS,D,DS,E	34 235	58 - 71						
	ASTM A 139	Grado B	35 241	60 min.						
	ASTM A 381	Grado Y35	35 240	60 min.						
	ASTM A 500	Grado A	33 228	45 min.						
		Grado B	42 290	58 min.						
	ASTM A 501		36 250	58 min.	A5.23 ^f				F7XX-EXXX-XX F7XX-ECXXX-XX	
	ASTM A 516	Grado 55	30 205	55 - 75	GMAW				A5.18	ER70S-X,ER70C- XC ER70C-XM (excluidos sufijos - GS)
		Grado 60	32 220	60 - 80						
	ASTM A 524	Grado I	35 240	60 - 85						
		Grado II	30 205	55 - 80						
	ASTM A 529		42 290	60 - 85						
	ASTM A 570	Grado 30	30 205	49 min.						
		Grado 33	33 230	52 min.		A52.8 ^f	ER70S-XXX E70C-XXX			
		Grado 36	36 250	53 min.						
		Grado 40	40 275	55 min.	FCAW	A5.20	E6XT-X, E6XT-XM E7XT-X, E7XT-XM (excluidos -2,-2M, - 3, -10, -13, -14X y sufijos -GS)			
	ASTM A 573	Grado 65	35 240	65 - 77						
		Grado 58	32 220	58 - 71						
	ASTM A 709	Grado 36 ^d	36 250	58 - 80						
	API 5L X	Grado B	35 240	60						
		Grado X42	42 290	60				A5.29 ^f	E6XTX-X, E6XT-XM E7XTX-X, E7XT-XM	
ABS	A, B, D, CS,DS,		58 - 71							
	Grado E ^c		58 - 71							

(CONTINÚA)

Tabla 17.1. Selección del metal del aporte según material base (86, 103)

	Requerimientos de especificaciones de los aceros				Requerimientos de metales de aporte								
	Especificación de aceros ^{a,b}	Grado	Resistencia a la fluencia Ksi - Mpa	Resistencia de tensión Ksi	Proceso	Espec. AWS ^c	Clasificación de electrodos ^g						
G r u p o 2	ASTM A 131	AH32, DH32, EH32	46 315	68 - 85	SMAW	A5.1	E7015, E7016, E7018, E7028						
		AH36, DH36, EH36	51 350	71 - 90									
	ASTM A 441		40 275	60 - 70.				SAW	A5.5 ^f	E7015-X E7016-X E7018-X			
	ASTM A 516	Grado 65	35 240	65 - 85									
		Grado 70	38 260	70 - 90									
	ASTM A 537	Clase I	45 310	65 - 90									
	ASTM A 570	Grado 50	50 345	65									
		Grado 55	55 380	70									
	ASTM A 572	Grado 42	42 290	60 min.	GMAW	A5.17	F7XX-EXXX F7XX-ECXXX						
		Grado 50	50 345	65 min.									
	ASTM A 588 ^e	4 in y abajo	50 345	70 min.							FCAW	A5.23 ^f	F7XX-EXXX-XX F7XX-ECXXX-XX
	ASTM A 595	Grado A	55 380	65 min.									
		Grado B y C	60 415	70 min									
	ASTM A 606 ^e		45 310	65 min.									
	ASTM A 607	Grado 45	45 310	60 min.	A5.18	A5.18	ER70S-X, ER70C-XC ER70C-XM (Electrodos con sufijos –GS son excluidos)						
		Grado 50	50 345	65 min.									
		Grado 55	55 380	70 min.									
	ASTM A 618	Grado Ib, II, III	46 315	65 min.				A5.28 ^f	A5.28 ^f	ER70S-XXX E70C-XXX			
	ASTM A 633	Grado A	42 290	63									
		Grado C, D	50 345	70									
	ASTM A 709	Grado 50	50 345	65 min.	A5.20	A5.20	E7XT-X, E7XT-XXM (Electrodos con el -2,- 2M, -3, -10, -13, -14X y sufijos –GS estan excluidos)						
		Grado 50W	50 345	70 min.									
	ASTM A 710	Grado A	55 380	65 min.									
	ASTM A 808		42 290	60 min.									
	ASTM A 913	Grado 50	50 345	65 min.									
	ASTM A 992		50 345	65				A5.29 ^f	A5.29 ^f	E7XTX-X E7XT-XXM			
	API 2H	Grado 42	42 290	62									
		Grado 50	50 345	70 min.									
API 2W	Grado 42	42 290	62										
	Grado 50	50 345	65 min.										
	Grado 50T	50 345	70 min.										
API 2Y	Grado 42	42 290	62	A5.29 ^f				A5.29 ^f	E7XTX-X E7XT-XXM				
	Grado 50	50 345	65 min.										
	Grado 50T	50 345	70 min.										
API 5L X	Grado X52	52 360	66 - 72										
ABS	AH32, DH32, EH32	45.5 315	71 - 90										
	AH36, DH36, EH36 ^e	51 350	71 - 90										

(CONTINÚA)

Tabla 17.1. Selección del metal del aporte según material base (86, 103)

	Requerimientos de especificaciones de los aceros				Requerimientos de metales de aporte		
	Especificación de aceros ^{a,b}	Grado	Resistencia a la fluencia Ksi - Mpa	Resistencia de tensión Ksi	Proceso	Espec. AWS ^c	Clasificación electrodos ^g
3 G r u p o	API 2W	Grado 60	60 414	75 min	SMAW	A5.5 ^f	E8015-X, E8016-X, E8018-X
	API 2Y	Grado 60	60 414	75 min.			
	ASTM A 572	Grado 60	60 415	75 min.			
		Grado 65	65 450	80 min	SAW	A52.3 ^f	F8XX-EXXX-XX, F8XX-ECXXX-XX
	ASTM A 537	Clase 2 ^e	46 315	80 - 100			
	ASTM A 633	Grado E ^e	55 380	75 - 100.			
	ASTM A 710	Grado A Clase 2	60 415	72 min	GMAW	A52.8 ^f	ER80S-XXX, E80C-XXX
	ASTM A 710	Grado A Clase 3	60 415	70 min	FCAW	A5.29 ^f	E8XTX-X E8XTX-XM
	ASTM A 913 ^h	Grado 60	60 415	75 min.			
	Grado 65	65 450	80 min.				
4 G r u p o	ASTM A 709	Grado 70W	70 485	90 -110.	SMAW	A5.5 ^f	E9015-X, E9016-X, E9018-X, E9018-M
					SAW	A52.3 ^f	F9XX-EXXX-XX, F9XX-ECXXX-XX
	ASTM A 852	Grado 70W	70 485	90 -110	GMAW	A52.8 ^f	ER90S-XXX, E90C-XXX
					FCAW	A5.29 ^f	E9XTX-X E9XTX-XM

^a En juntas involucrando materiales de base de grupos diferentes, cualquiera de los siguientes metales de aporte puede ser usado: (1) aquel material base con mayor resistencia comparable, (2) aquel material base con menor resistencia comparable y produce un depósito de bajo hidrógeno. El precalentamiento debe estar en conformidad con los requisitos aplicables al grupo de más alta resistencia.

^b Acero comparable con norma API 2B (Tubos fabricados) de acuerdo al acero usado.

^c Cuando las soldaduras sean relevadas de esfuerzos, el metal depositado no debe exceder 0.05 % de vanadio.

^d Solo deben ser usados electrodos de bajo hidrógeno cuando se suelda acero ASTM A36 ó ASTM A 709 Grado 36 en espesor mayor a 1 in (25 mm) para estructuras cargadas cíclicamente.

^e Materiales y procedimientos de soldadura especiales (por ejemplo E80XX-X electrodos de baja aleación) pueden ser requeridos para tenacidad comparable del metal base (para aplicaciones involucrando carga de impacto ó baja temperatura) o para corrosión atmosférica y características a la intemperie.

^f Metales de aporte del grupo de aleación B3, B3L, B4, B4L, B5, B5L, B6, B6L, B7, B7L, B8, B8L, B9, o cualquier grado BXH en AWS A5.5, A5.23, A5.28 o A5.29 no están precalificados para uso en la condición como soldado.

^g Electrodos AWS A5M (unidades SI) de la misma clasificación pueden ser usados en vez de electrodos con clasificación AWS A5.

^h La limitación de aporte térmico de 5.7 no debe aplicar para acero ASTM A913 grado 60 ó 65.

En soldadura a filete, el área efectiva de una soldadura de filete será la longitud efectiva multiplicada por la garganta efectiva. La garganta efectiva de una soldadura de filete será la distancia más corta entre la raíz y la cara exterior esquemática del filete. Se permite tomar un mayor valor para la garganta efectiva si, mediante ensayos que combinen las variables del proceso de producción y del procedimiento, se demuestra que de manera consistente se obtiene una penetración más allá de la raíz esquemática del filete, en otras palabras se tendrá en cuenta la garganta efectiva, la cual se puede ver en la figura 3.8. El tamaño de una soldadura de filete no deberá ser menor que el tamaño requerido para transmitir las fuerzas calculadas ni menor que el mínimo según la tabla 17.2. El tamaño máximo de las soldaduras de filete será: (149)

* A lo largo de los bordes de un material con espesor menor de 6 mm; el espesor del material.

* A lo largo de los bordes de un material con espesor de 600 o más; el espesor del metal menos 1.6 mm, excepto cuando la soldadura se haya detallado en los planos para obtener el espesor completo de la garganta. En la soldadura ejecutada, se permite que la distancia entre el borde del metal base y el talón de la soldadura sea menor que 1.6 mm siempre y cuando el tamaño de la soldadura sea claramente verificable.

Tabla 17.2. Tamaño mínimo de las soldaduras de filete (149)

Espesor de la parte más delgada a unir (mm)	Tamaño mínimo de la soldadura de filete^(a) (mm)
Hasta 6.4 inclusive	3
Mayor que 6.4 hasta 12.7	5
Mayor que 12.7	6
Mayor que 19.1	8

(a) Dimensión del lado de la soldadura de filete. Debe aplicarse en una sola pasada.

Nota: Véase numeral F2.10.2.2.2 para el máximo tamaño de soldadura de filete

Sigue con **pernos y partes roscadas** y aclara dónde y cuándo se usan, así como las condiciones de uso de los pernos. La condición de apriete ajustado se define como el apriete requerido para que las partes conectadas queden en contacto firme. Los pernos que hayan de ser llevados a un nivel de apriete distinto de la condición de apriete ajustado deberán quedar claramente identificados en los planos de diseño y de montaje. Todos los pernos de alta resistencia que se especifiquen en los planos para usarse en juntas pre tensionadas o de deslizamiento crítico deberán apretarse hasta obtener una tensión no menor que la indicada en la tabla 17.3, en donde el **grupo A** corresponde a pernos de alta resistencia se agrupan según la resistencia del material ASTM A325, A325M, F1852, A354 Grado BC y A449 y el grupo B corresponde a ASTM 490, A490M, F2280 y A354 Grado BD.

Tabla 17.3. Tensión mínima de instalación de pernos en kilonewtons (149)

Tamaño del perno en milímetros y en pulgadas	Grupo A: Pernos ASTM A325, ASTM F1852.	Grupo B: Pernos ASTM A490, ASTM F2280.
12.7 (1/2 in)	53	67
15.9 (5/8 in)	84	107
19.1 (3/4 in)	125	156
22.2 (7/8 in)	173	218
25.4 (1 in)	227	285
28.6 (1 1/8 in)	249	356
31.8 (1 1/4 in)	316	454
34.9 (1 3/8 in)	378	538
38.1 (1 1/2 in)	458	658

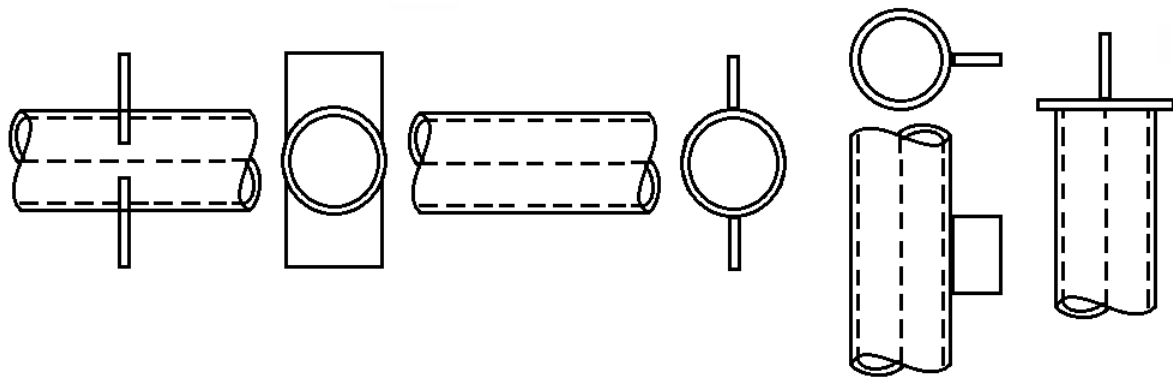
Igual a 0.70 veces la resistencia mínima a tensión de los pernos, redondea al KN más cercano, como se establece en las especificaciones ASTM para pernos A325 y A490 con roscas UNC.

La distancia entre centros de perforaciones estándar, agrandadas o ranuradas no podrá ser menor que $2 \frac{2}{3}$ veces el diámetro nominal del conector (d) y se recomienda usar como mínimo 3d. La distancia máxima del centro de cualquier perno o remache al borde más próximo de las partes en contacto será igual a 12 veces el espesor de la parte conectada en consideración, sin exceder de 150 mm. El espaciamiento longitudinal de conectores entre dos elementos en contacto continuo, en el caso de una platina y un perfil o de dos platinas, será: Para miembros pintados o miembros sin pintar que no estén sometidos a corrosión, el espaciamiento no será mayor que 24 veces el espesor de la platina más delgada ni de 300 mm; y para miembros sin pintar de acero resistente a la corrosión atmosférica expuestos a la corrosión, el espaciamiento no será mayor que 14 veces el espesor de la platina más delgada ni de 180 mm (149).

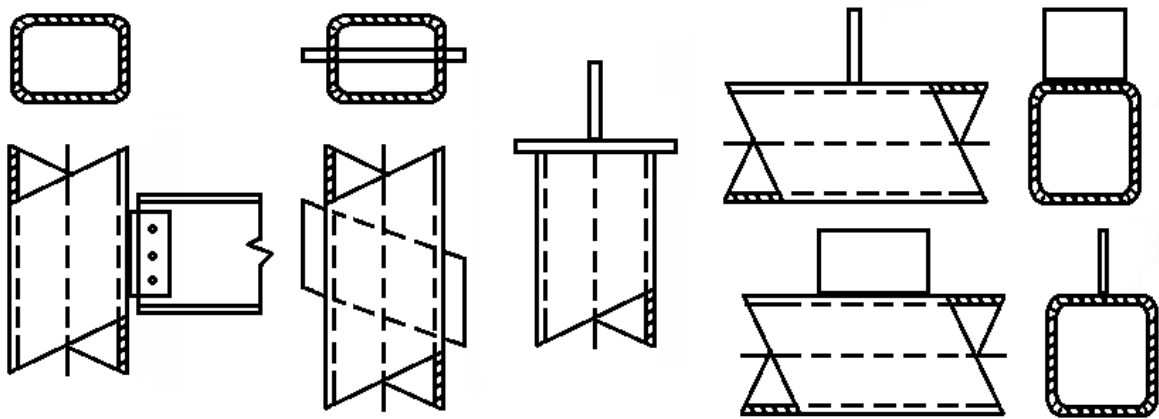
Los elementos afectados de los miembros conectados y elementos de conexión se aplican a los elementos de los miembros en la zona de la conexión y a los elementos de conexión tales como platinas, cartelas, ángulos y ménsulas. En este numeral dan la resistencia de elementos a tensión, compresión, flexión, cortante y resistencia al desgarramiento en bloque. Sigue platinas de relleno soldadas y atornilladas. **Los empalmes** con soldaduras acanaladas en vigas y vigas armadas de alma llena se diseñarán para desarrollar la resistencia nominal de la más pequeña de las secciones conectadas. Otros tipos de empalmes en secciones transversales de vigas y vigas armadas de alma llena se diseñarán para desarrollar la resistencia requerida por las fuerzas que actúan en el punto del empalme. La **resistencia de diseño al aplastamiento** de superficies en contacto, se determinará para el estado límite de aplastamiento (fluencia local a compresión). Sigue **las bases de columnas y aplastamiento sobre concreto**, en donde se deberá proveer la adecuada transmisión de las cargas y momentos de las columnas a las bases y cimentaciones. **En pernos de anclaje y elementos embebidos**, dice que los pernos de anclaje se diseñarán para proveer la resistencia requerida a nivel de las bases de las columnas de la estructura, incluyendo las componentes netas de tensión de cualquier momento flector que pueda resultar de las combinaciones de carga estipuladas en el numeral **F.2.2.2. Los pernos de anclaje** se diseñarán de acuerdo con los requerimientos

para partes roscadas de la tabla F.2.10.3-2. El diseño de las bases de las columnas y de los pernos de anclaje para la transferencia de fuerzas a la fundación de concreto, incluyendo el apoyo sobre los elementos de concreto, deberá satisfacer los requerimientos del Título C del presente Reglamento. Las **aletas y almas con fuerzas concentradas** se aplican a fuerzas concentradas simples y dobles aplicadas perpendicularmente a la(s) aleta(s) de perfiles en **I** de aleta ancha y perfiles armados similares. Una fuerza concentrada simple puede ser de tensión o de compresión. Las fuerzas concentradas dobles consisten en una fuerza de tensión y una de compresión, que forman un par sobre el mismo lado del miembro cargado. Cuando la resistencia requerida exceda la resistencia de diseño determinada por los estados límites considerados en este numeral, se proporcionarán rigidizadores o placas de enchape dimensionados para atender la diferencia entre la resistencia requerida y la resistencia de diseño para el estado límite aplicable. El diseño de los rigidizadores deberá satisfacer además los requerimientos del numeral F.2.10.10.8. Las placas de enchape deberán igualmente satisfacer los requisitos de diseño del numeral F.2.10.10.9. (149).

En el numeral **F.2.11. Diseño de conexiones de perfiles tubulares estructurales (PTE) y miembros en cajón** abarca las consideraciones de diseño aplicables a las conexiones para miembros fabricados en perfiles tubulares estructurales (PTE) o de sección en cajón con espesor de pared uniforme. El diseño de las conexiones controla con frecuencia el dimensionamiento de los miembros en PTE, en particular el espesor de los miembros principales de las armaduras, y debe por lo tanto ser considerado desde el diseño inicial. En F.2.11.1 **fuerzas concentradas sobre PTE** dan las definiciones de los parámetros usados y la resistencia de las conexiones de platinas a perfiles tubulares estructurales (PTE). En la figura 17.11, se dan algunas conexiones de platinas sobre perfiles tubulares estructurales (149).



a) Conexiones de platina a PTE circular.



b) Conexiones de platina a PTE rectangular.

Figura 17.11. Conexiones de platinas sobre perfiles tubulares estructurales PTE (149)

En F.2.11.2 **conexiones de PTE a PTE en armaduras** se definen como se realizan las conexiones de PTE a PTE en armaduras que son conformadas por uno o más ramales que se sueldan directamente a un miembro principal continuo que pasa a través de la conexión. En la figura 17.12, se dan algunas conexiones PTE a PTE en armaduras (149).

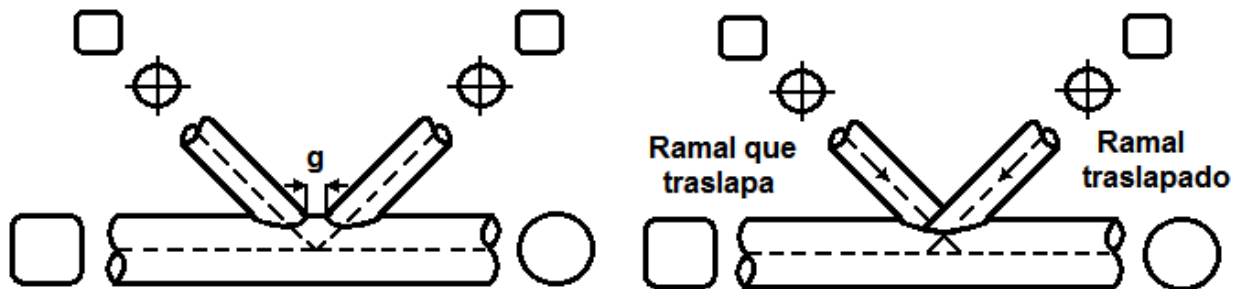


Figura 17.12. Conexiones PTE a PTE en armaduras (149)

En la figura 17.13, se presentan algunos modos típicos de falla para conexiones de PTE a PTE en armaduras (149).

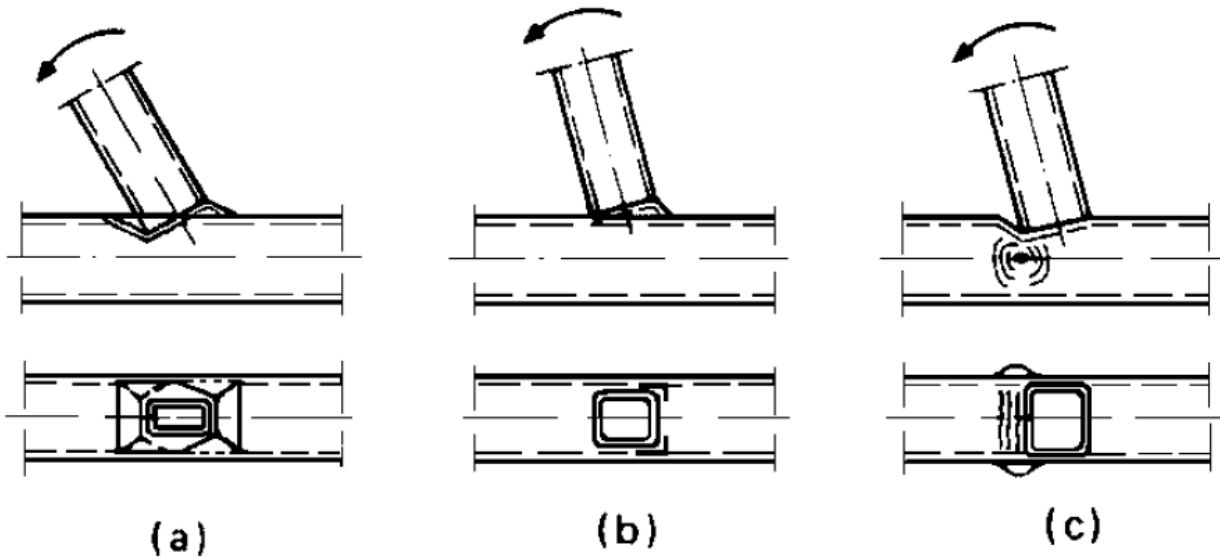


Figura 17.13. Modos típicos de falla para conexiones de PTE a PTE en armaduras

En F.2.11.3 **conexiones a momento de PTE a PTE** definen estas conexiones como aquellas conexiones en donde uno o dos ramales están soldados directamente a un miembro principal, estando el miembro principal o los ramales solicitados por momentos flectores. Una conexión se clasificará como una conexión en **T** cuando hay un ramal y éste es perpendicular al miembro principal, y como una conexión en **Y** cuando hay un ramal pero éste no es perpendicular al miembro principal. Como una conexión en cruz cuando hay un ramal sobre cada uno de los dos lados opuestos del miembro principal. Para los efectos del numeral F.2.11, los ejes del ramal o de los ramales y del miembro principal deberán estar en un plano común. En F.2.11.3 **soldaduras de los ramales**, al diseñar las soldaduras a los ramales deberá darse la debida consideración a la condición de no uniformidad en la transferencia de carga a lo largo de la línea de soldadura, debida a las diferencias en las rigideces relativas de las paredes de los PTE en conexiones de PTE a PTE y de platinas transversales a PTE (149).

En el numeral F.2.12 **diseño para estados límites de servicio**, se establecen los requisitos del diseño para estados límites de servicio, garantizando que bajo uso normal, se preserven

la funcionalidad, el aspecto, la facilidad para el mantenimiento y la durabilidad de una edificación, así como la comodidad de sus ocupantes. Los valores límite de la respuesta estructural para asegurar la funcionalidad (por ejemplo, deflexiones máximas, aceleraciones) se adoptarán teniendo en cuenta la función para la cual se destina la estructura. Las condiciones de servicio se evaluarán usando las combinaciones de carga apropiadas para los estados límites de servicio identificados (149).

En el numeral F.2.13 **Fabricación, montaje y control de calidad**, se presentan los requisitos que se deben cumplir para los planos de taller, la fabricación, la pintura de taller, el montaje y el control de calidad. En el ítem F.2.13.1, **planos de taller y montaje** dice que con anterioridad a la fabricación de una estructura se deben preparar planos de taller que suministren la totalidad de la información necesaria para la fabricación de cada uno de los componentes, incluyendo la localización, tipo y dimensiones de las soldaduras y los pernos. Igualmente, los planos de montaje se prepararán con anterioridad al montaje y deberán proporcionar la información necesaria para el montaje de la estructura. Los planos de taller y los de montaje distinguirán claramente entre soldaduras y pernos de taller y de campo e identificarán claramente las conexiones con pernos de alta resistencia que deban ser de deslizamiento crítico o pre tensionadas. Los planos de taller y los de montaje deberán ejecutarse teniendo en cuenta la agilidad y economía en la fabricación y el montaje. En el ítem F.2.13.2 **Fabricación** dice que se permite la aplicación local de calor o de medios mecánicos para generar o corregir la contra flecha, la curvatura y la rectitud. La temperatura en las áreas sometidas a calentamiento, según mediciones por métodos aprobados, no excederá de 593 °C para aceros A514 y A852 ni de 649 °C para otros aceros. Los bordes cortados por fusión deberán satisfacer los requisitos de AWS D1.1. La técnica de la soldadura, la ejecución, el aspecto y la calidad de la soldadura, así como los métodos a usarse en la corrección de los trabajos no conformes, estarán de acuerdo con AWS D1.1. Las partes de los miembros que se conectan con pernos deberán estar bien aseguradas con pasadores o pernos y rígidamente unidas durante el ensamble. El empleo de pasadores de ensamble en las perforaciones durante el montaje no deberá distorsionar el metal ni agrandar las perforaciones. El alineamiento deficiente de las perforaciones será causa de

rechazo. En el ítem F.2.13.3 **pintura de taller** dice que la preparación de la superficie y la pintura en el taller estarán de acuerdo con las provisiones del código de prácticas estándar para estructuras metálicas, norma técnica Colombiana ICONTEC. No se requiere la aplicación de pintura de taller a menos que se haya especificado en los documentos del proyecto. A menos que se especifique lo contrario en los documentos de diseño, las zonas que estén a menos de 50 mm de cualquier soldadura de campo estarán libres de cualquier material que pueda impedir la correcta ejecución de la soldadura o producir humos inaceptables durante el proceso de soldeo. En el ítem F.2.13.4 **montaje** dice que las bases de las columnas deberán quedar bien niveladas, con la elevación correcta y en pleno contacto con las superficies de concreto o mampostería, además la estructura de acero de los edificios deberá erigirse a plomo y con los alineamientos requeridos dentro de los límites definidos por el código de prácticas estándar para estructuras metálicas, norma técnica Colombiana ICONTEC (149).

En el numeral F.2.14 **Control de calidad y supervisión técnica**, se presentan los requisitos mínimos para el control de calidad, la supervisión técnica y la inspección mediante ensayos no destructivos para las estructuras de acero y los elementos de acero de miembros de construcción compuesta para edificios y otras estructuras. El control de calidad estará a cargo del fabricante y el montador, mientras que la supervisión técnica estará a cargo de otros cuando así sea requerido. Los ensayos no destructivos serán ejecutados por la firma responsable de la supervisión técnica, excepto lo permitido en el numeral F.2.14.7. En el ítem F.2.14.2 **programa de control de calidad del fabricante y el montador**, el fabricante y el montador establecerán y mantendrán procedimientos de control de calidad y realizarán inspecciones para asegurar que su trabajo se ejecute de acuerdo con el Capítulo F.2 de este reglamento y con los documentos del proyecto. En el ítem F.2.14.3 **Documentos del fabricante y el montador**, dice que antes de iniciarse las actividades respectivas, el fabricante o el montador enviarán al diseñador estructural o a su delegado los planos de taller y los planos de montaje, de acuerdo con el código de prácticas estándar para estructuras de acero, ICONTEC. En el ítem F.2.14.3 **Disponibilidad de los documentos**, dice que los siguientes documentos deberán mantenerse disponibles en

formato electrónico o impresos para revisión por parte del diseñador estructural o su delegado, con anterioridad a las actividades de fabricación o montaje, según sea aplicable:
(149)

1. Para los elementos principales de acero estructural, copias de los reportes de ensayos de los materiales, de acuerdo con el numeral F.2.1.3.1.
2. Para las piezas forjadas y de fundición, copias de los reportes de ensayos de los materiales, de acuerdo con el numeral F.2.1.3.2.
3. Para los conectores, copias de los certificados del productor.
4. Para los conectores de los tableros metálicos, copias de las especificaciones del producto o catálogos publicados por el productor. Las especificaciones deberán incluir la descripción del producto, limitaciones de uso y recomendaciones de instalación.
5. Para pernos de anclaje y barras roscadas, copias de los reportes de ensayos de los materiales
6. Para los consumibles de soldadura, copias de los certificados del productor.
7. Para los conectores tipo espigo con cabeza, copias de los certificados del productor de acuerdo.
8. Para los metales de aporte y fundentes para las soldaduras, copias de las hojas de especificaciones del producto o catálogos publicados por el productor. Las especificaciones deberán incluir la descripción del producto, limitaciones de uso, parámetros típicos o recomendados para soldar, y condiciones de almacenamiento y exposición, incluyendo el uso de hornos cuando sea aplicable.
9. Especificaciones de los procedimientos de soldadura (WPS).
10. Registros de calificación de los procedimientos (PQR) para procedimientos no incluidos entre los precalificados por la norma AWS D1.1/D1.1M, o por la norma AWS, según sea aplicable.
11. Registros de calificación de los soldadores (WPQ) y registros de continuidad.
12. Manual de control de calidad escrito del fabricante o el montador, según sea aplicable, que deberá incluir como mínimo: Procedimientos de control del material, procedimientos de inspección, tratamiento de no conformidades, calificación de los inspectores de control de calidad del fabricante o el montador, según sea aplicable.

En el ítem F.2.14.4, **personal a cargo de la inspección y los ensayos no destructivos** dice que el personal de inspección del **control de calidad de la soldadura** deberá estar calificado de acuerdo con el programa de control de calidad del fabricante o el montador, según el caso, y de acuerdo con uno de los siguientes requisitos: Inspector de soldadura certificado por la AWS o según las provisiones de la norma AWS D1.1/D1.1M, artículo 6.1.4, o que esté calificado por la asociación colombiana de soldadura y ensayos no destructivos, ACOSEND como inspector de construcciones soldadas nivel II. El personal de inspección de control de calidad para los pernos deberá estar calificado con base en entrenamiento y experiencia documentados en la inspección de conexiones estructurales pernadas. El personal a cargo de los **ensayos no destructivos**, distintos de la inspección visual, deberá estar calificado de acuerdo con sociedad americana de ensayos no destructivos (ASNT), según la práctica recomendada para la calificación y certificación de personal para ensayos no destructivos, SNT-TC-1A, o ASNT CP-189; también puede ser calificado por la asociación colombiana de soldadura y ensayos no destructivos, ACOSEND, como Inspector de Ensayos No Destructivos, nivel II. En el ítem F.2.14.5, **requisitos mínimos para la inspección de edificios de acero estructural**, dice que en la inspección de control de calidad, los documentos del proyecto aplicables serán los planos de taller y los planos de montaje, y las especificaciones, códigos y estándares referenciados que sean aplicables y deberán ser ejecutadas por el inspector de control de calidad del fabricante o el montador. El inspector de la supervisión técnica debe inspeccionar las piezas fabricadas o la estructura montada, según el caso, para verificar el cumplimiento de los detalles que se muestran en los documentos del proyecto, tales como riostras, rigidizadores, localización de los miembros y detalles de las conexiones. En el ítem F.2.14.6, **requisitos mínimos para la inspección de construcción compuesta**, dice que para la inspección del acero estructural y el tablero metálico usados en una construcción compuesta se deben cumplir con los requisitos de la norma AWS D1.1/D1.1M y AWS D1.3/D1.3M. En el ítem F.2.14.7, **materiales y mano de obra no conformes**, dice que para cualquier etapa del desarrollo de los trabajos se podrán identificar y rechazar materiales o mano de obra no conformes con los documentos del proyecto. La corrección de las condiciones de no conformidad en los materiales o la mano de obra deberá contar con la aprobación del

diseñador estructural y se deberán enviar al fabricante y al montador, los reportes de no conformidad y los reportes de reparaciones, reemplazos o aceptación de los ítems no conformes (149).

En el numeral F.2.15 **Diseño basado en un análisis inelástico**, se presenta el diseño basado en un análisis inelástico, considerando la redistribución de las fuerzas y momentos en los miembros y conexiones que ocurre cuando se presenta una fluencia localizada. La resistencia de diseño del sistema estructural, de sus miembros y conexiones deberá ser igual o superior a la resistencia requerida determinada a partir del análisis inelástico. Estas provisiones no son aplicables a un diseño sísmico. En el numeral F.2.16 **Empozamiento** se proporcionan los métodos para determinar si un sistema de cubierta tiene la rigidez y la resistencia adecuadas para evitar una falla por empozamiento. En el numeral F.2.17 **Diseño por fatiga** se aplica a miembros y conexiones sometidas a un alto número de ciclos de carga, en el rango elástico de esfuerzos y con frecuencia y magnitud suficiente para iniciar grietas y falla progresiva en lo que se define como el estado límite de fatiga. Esta sección se aplica a esfuerzos calculados para condiciones de servicio. El rango de esfuerzos se define como la magnitud de la variación de los esfuerzos debida a la aplicación o remoción de la carga viva de servicio. En el caso de inversión de esfuerzos, el rango de esfuerzos se calcula como la suma numérica de los esfuerzos repetidos máximos de tensión y compresión o la suma numérica de los esfuerzos cortantes máximos en sentidos opuestos en el punto de probable iniciación de grietas (149).

En el numeral F.2.18 **Diseño para condiciones de incendio** se proporcionan criterios para el diseño y evaluación de componentes y sistemas de acero estructural para condiciones de incendio. Se prescriben criterios para determinar la temperatura de diseño, la expansión térmica y la degradación en las propiedades mecánicas de los materiales a temperaturas elevadas, que causan la disminución progresiva en la resistencia y la rigidez de los componentes y sistemas estructurales sometidos a temperaturas elevadas. Los componentes estructurales del edificio deben diseñarse de tal forma que mantengan su función de soportar las cargas durante el incendio de diseño, al tiempo que satisfagan los otros

objetivos de desempeño requeridos para el uso del edificio. El numeral F.2.19 **Evaluación de estructuras existentes** se aplica a la evaluación de la resistencia y la rigidez de estructuras existentes bajo cargas de gravedad por medio de análisis estructural, ensayos de carga o la combinación de ambos. Para dicha evaluación, el acero no está limitado a las calidades listadas en la sección F.2.1.5.1. Esta sección no es aplicable para ensayos de carga cuyo objeto sea la evaluación de los efectos de cargas sísmicas o móviles (vibración). Estas provisiones son aplicables cuando se requiera la evaluación de una estructura de acero existente para verificar unas condiciones específicas de cargas de diseño y para determinar la resistencia de diseño de un miembro o sistema estructural (149).

En el numeral F.2.20 **Arriostramiento de columnas y vigas** se especifica la resistencia y la rigidez mínimas requeridas de los elementos usados como arriostramiento de manera que sean efectivos para generar puntos arriostrados en columnas, vigas y viga-columnas. La evaluación de la rigidez proporcionada por una riostra debe considerar las propiedades del miembro y su geometría, así como los efectos de las conexiones y detalles de anclaje. En el numeral F.2.21 **Métodos alternos de diseño por estabilidad**, se presentan alternativas al método de análisis directo para el diseño por estabilidad, definido en el numeral F.2.3. Los dos métodos alternos que se presentan son el método de la longitud efectiva y el método de análisis de primer orden. En el numeral F.2.22 **Procedimiento aproximado de análisis de segundo orden** se presenta como alternativa un análisis riguroso de segundo orden, es un procedimiento que tiene en cuenta los efectos de segundo orden a través de la amplificación de las resistencias requeridas que se obtienen de un análisis de primer orden (129).

18. BIBLIOGRAFÍA

1. Villegas, Gustavo (2012). *Caracterización del sector metalmecánico y área de soldadura*. SENA. Bogotá.
2. Marulanda, José y Alucema, Oscar (2014). *Inspección de soldadura*. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira.
3. American Welding Society (2010). *Welding inspection technology*. AWS. Miami.
4. Oliva, Carlos (2017). *Curso Inspector de Soldadura AWS-QC1*. Instituto Chileno de Soldadura. <http://es.scribd.com/doc/50005935/Libro-Inspector-de-Soldadura-AWS>,
5. Hicks, John (2000). *Welded design - Theory and practice*. Abington, Cambridge.
6. Reina, Manuel (2014). *Soldadura de los aceros*. Weld-Work. Madrid-España.
7. Carrillo, Francisco y López, Elena (1998). *Soldadura, corte e inspección de obra soldada*, Universidad de Cádiz. Cádiz.
8. UTP (2012). *Memorias del Diplomado de soldadura*. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira.
9. Fotos. 2013. *Imágenes google*. <http://www.elnuevoherald.com/2013/05/24/1483376/un-puente-se-derrumba-en-washington.html>. Consulta en febrero 2017.
10. Climent, Salvador (2005). *Clasificación de los costes de calidad en la gestión de la calidad total*. Universidad de Valencia. <file:///E:/libro%20soldadura/Libro.%20Inspeccion%20de%20soldadura/Costo%20de%20calidad.2005.pdf>. Consulta en febrero 2017.
11. Gómez, Elizabeth (2013). Cálculo de los costos de calidad en la Unidad Empresarial de Base Producciones Varias, Cienfuegos. *Visión de futuro*. (17): 2.
12. Díaz, Gustavo (2009). *Inspección y control de calidad en la aplicación de soldadura de elementos estructurales*. Tesis de grado. Instituto Politécnico Nacional. México.
13. Sena (2000). *Cálculo de los costos, factores económicos y de productividad en la soldadura*. Seminario taller internacional de soldadura. Bogota.
14. Lynn, D. Brown, L. Clark, G. Grantham J. and Johnson. E. (2001). *Welding Handbook. Chapter 12. Economics of Welding and Cutting*. AWS. Miami.
15. Maraniello, Eduardo (2006). *Costos de la soldadura*. Soldar Conarco. ESAB. Buenos Aires.
16. Gema Herramientas (2016). *Te contamos como calcular el costo de tu soldadura*. <http://www.gemaherramientas.com.ar/calculo-de-costos/>. Diciembre, 2016.
17. Mazuera, David. Suárez, John. y Giraldo, Jorge (2011). “Estudio de productividad en la soldadura del acero MIL A 46100 con los procesos GMAW y SMAW”. *Rev.fac.ing.univ. Antioquia*. (59): 66-74.
18. Marulanda, José. Zapata, Alberto y Mesa, Dairo (2007). *Fundamentos en la soldadura de los metales*. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira.
19. Askeland, Donald (2016). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. International Thomson Editores. México.
20. Callister, William (2007). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Editorial Reverte. México.
21. Smith, William (2014). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. McGraw-Hill.
22. Shackelford, James (2010). *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*. Pearson Educación. Madrid.
23. Universidad de Sevilla (2016). *Paseo virtual por las estructuras cristalinas de los materiales*. http://www.mim-us.es/estructuras_cristalinas/estructuras_cristalinas.html. Consulta en Marzo 2017.

24. Vaporinox. Ingeniería. S.L.R. *Aceros inoxidables. Productos y accesorios*. <http://vaporinox.com/productos/aceros-inoxidables/#prettyPhoto>. Diciembre, 2016.
25. Riba, Carles (2008). *Selección de materiales en el diseño de máquinas*. Ediciones UPC. Barcelona.
26. Sealing, Calvo (2016). *Clasificación aceros inoxidables*. http://calvosealing.com/sites/default/files/acero_inoxidable_clasificacion_0.pdf. Consulta en diciembre 2016.
27. Gómez, Orlando (1993). *Soldadura de Metales*. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.
28. ABB (2006). *Manual de soldadura*. ABB. Alemania.
29. The Lincoln electric Company (2012). *How to read shop drawings: With special reference to welding and welding symbols*. The Lincoln Electric Company. Michigan.
30. Giachino, Joseph y Weeks, William (2007). *Técnica y práctica de la soldadura*. Editorial Reverte. Madrid.
31. American welding society (2012). *Standard symbols for welding, brazing and nondestructive examination*. AWS A2.4. Miami.
32. Colin, Simmons and Dennis, Maguire (2012). *Manual of Engineering Drawing. Chapter 33 - Welding and Welding Symbols*. Butterworth-Heinemann. Oxford.
33. Eutectic – Castolin (2008). *Manual de soldadura*, Eutectic – Castolin. Bogotá
34. Guivernau, José (2011). *Procesos de soldadura aplicados en la construcción naval*. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.
35. Alonso, Juan (2016). *El Proceso de Soldadura por Arco con Electrodo Revestidos*. Capítulo IIIb. <http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanica-general/MATERIAL%20BIBLIOGRAFICO%20TECNICO%20PARA%20APOYO%20DOCENTE/APORTES%20VARIOS%20PARA%20DOCENTES/CURSO%20SOLDADURA%20PRACTICO/Capitulo%20III-b%20-%20El%20Proceso%20de%20Soldadura%20por%20Arco%20con%20Electr.pdf>. Consulta en julio 2016.
36. Fronius (2016). www.fronius.com/welding.technology/focus.welding.htm. Consulta en julio 2016.
37. Yangyang, Zhao and Hyun Chung (2018). “Numerical simulation of the transition of metal transfer from globular to spray mode in gas metal arc welding using phase field method”. *Journal of Materials Processing Tech.* (251): 251-261.
38. Shanti, Meena. Ravi, Butola. Qasim, Murtaza. and Hardik, Jayantilal (2017). “Metallurgical Investigations of Microstructure and Micro hardness across the various zones in Synergic MIG Welding of Stainless Steel”. *Materials Today: Proceedings* (4): 8240-8249.
39. Electromanufacturas S.A. (2015). *Manual de Soldadura*. Electromanufacturas. Bogotá.
40. Jeffus, Larry (2009). *Soldadura: principios y aplicaciones*, Cesol, Madrid.
41. S. Selvamani, K. Palanikumar, K. Umanath and D. Jayaperumal (2015). “Analysis of friction welding parameters on the mechanical metallurgical and chemical properties of AISI 1035 steel joints”. *Materials and Design.* (65): 652-661.
42. López, Luis (2014). *Soldadura por fricción*. Universidad del Bio-Bio. Trabajo de grado.
43. Ranvijay, Kumar. Rupinder, Singh. Rosa, Penna and Feo, Luciano. (2018). “Weldability of thermoplastic materials for friction stir welding- A state of art review and future applications”. *Composites Part B.* (137): 1-15.
44. Kondapalli, Siva. Chalamalasetti, Srinivasa and Damera Nageswara (2012). “Advances in plasma arc welding: a review”. *Journal of mechanical engineering and technology.* (4): 35-59.
45. Yinbao, Tian. Junqi, Shen. Shengsun, Hu. Ying, Liang and Pengfei, Bai (2018). “Effects of ultrasonic peening treatment on surface quality of CMT- welds of Al alloys”. *Journal of Materials Processing Tech.* (254): 193-200.

46. Yanling, Xu. Na, Lv. Gu, Fang. Shaofeng, Du. Wenjun, Zhao. Zhen, Ye and Shanben, Chen (2017). “Welding seam tracking in robotic gas metal arc welding”. *Journal of Materials Processing Tech.* (248): 18-30.
47. Okimoto, Maria. Okimoto, Paulo and Goldbach, Carlos (2015). “User Experience in Augmented Reality applied to the Welding Education”. *Procedia Manufacturing.* (3): 6223 -6227.
48. Indura (2013). *Manual de sistemas y materiales de soldadura*, Indura. Chile,
49. Marulanda, José. Tristancho, José y González, Hector (2015). *Rociado térmico*. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira.
50. Trevisan, Rosaenna y Lima, Carlos (2002). *Aspersao Termica Fundamentos E Aplicacoes*. Editorial Artliber. Sao Paulo.
51. Krzysztof, Szymański, Adam, Hernas. Grzegorz, Moskal and Hanna Myalska (2015). “Thermally sprayed coatings resistant to erosion and corrosion for power plant boilers - A review”. *Surface & Coatings Technology.* (268): 153-164.
52. Marulanda, José. Tristancho, José y González, Héctor (2014). “La tecnología de recuperación y protección contra el desgaste está en el rociado térmico”. *Prospectiva.* (12): 1.
53. Linspray (2016). *Proyección térmica de superficies*. ABELLO LINDES. [http://www.abellolinde.es/International/Web/LG/ES/likeges.nsf/repositorybyalias/a_linspray/\\$file/LINSPRAY.PDF](http://www.abellolinde.es/International/Web/LG/ES/likeges.nsf/repositorybyalias/a_linspray/$file/LINSPRAY.PDF). Consulta en junio 2014.
54. Lech, Pawlowski (2008). *The science and engineering of thermal spray coatings*. John Wiley and Sons. Chichester.
55. J. Davis (2013). *Handbook of Thermal Spray Technology*. Thermal Spray Society and ASM International. Ohio.
56. Ellor, James. Young, Walter and Repp, John (2016). *Thermally Sprayed Metal Coatings to Protect Steel Pilings: Final Report and Guide*. TRB org. Washington.
57. Marulanda, José. Tristancho, José and Remolina, Aduljay (2014). “Corrosión en sales fundidas de un acero recubierto mediante rociado térmico por llama”. *Prospectiva.* (12): 5.
58. Cinca, Nuria. Camello, Carlos and Guilemany, José (2013). “An overview of intermetallics research and application: Status of thermal spray coatings”. *Journal of Materials Research and Technology* (2): 75-86.
59. Eutectic – Castolin (2016). Coating technologies. <http://www.castolin.com/content/our-technologies>.
60. Centro de proyección térmica (2016). https://cv.mec.es/programas/JORNADAS_SEGUIMIENTO/MAT2001Oviedo/Presentaciones/2604pmMAT2001-3399-p.ppt. Consulta en junio 2014.
61. Pierre, Fauchais, Heberlein, Joachim and Boulos, Maher (2014). *Thermal Spray fundamentals: from powder to part*. Springer, London.
62. Muhamad, Hafiz. Noriyati, Saad. Sunhaji, Abas and Nor, Shah (2013). “Thermal Arc Spray Overview”. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* (46): 1.
63. Sulzer Metco (2014). www.sulzermetco.com. Consulta en junio 2014.
64. S. Salavati, T. Coyle and J. Mostaghimi (2016). “Twin wire arc spray process modification for production of porous metallic coatings”. *Surface & Coatings Technology* (286): 16–24.
65. Lutz-Michael Berger (2015). “Application of hardmetals as thermal spray coatings”. *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials* (49): 350-364.
66. S. Sampath and H. Herman (2014). *Thermal Spray Coating*. New York. <http://www.matscieng.sunysb.edu/tsl/thermal/article1.html>. Consulta en junio 2014.

67. S. Karthikeyana, V. Balasubramanian and R. Rajendran (2014). “Developing empirical relationships to estimate porosity and microhardness of plasma-sprayed YSZ coatings”. *Ceramics International* (40): 3171-3183.
68. V. Kumar and B. Kandasubramanian (2016). Processing and design methodologies for advanced and novel thermal barrier coatings for engineering applications. *Particuology* (27): 1-28.
69. M. Karger, R. Vaßen and D. Stöver (2011). “Atmospheric plasma sprayed thermal barrier coatings with high segmentation crack densities: Spraying process, microstructure and thermal cycling behavior”. *Surface & Coatings Technology* (206): 16-23.
70. Eyheralde, Miguel (2016). Inspección en soldadura. <http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanicageneral/soldadura/05%20Metalurgia%20de%20la%20soldadura.pdf>. Consulta en diciembre 2016.
71. Osorio, Víctor (2016). *Metalurgia de la soldadura*. http://metalurgia.usach.cl/sites/metalurgica/files/paginas/5_-_metalurgia_de_la_soldadura_-_victor_osorio_1.pdf. Consulta en diciembre 2016.
72. Jie Xi and Hui Jin. (2018). “Numerical modeling of coupling thermal–metallurgical transformation phenomena of structural steel in the welding process”. *Advances in Engineering Software* (115): 66-74.
73. Gutiérrez, Juan (2004). *Relación entre microestructura y resistencia al desgaste abrasivo de recubrimientos de carburos de cromo y carburos de tungsteno depositados por soldadura para aplicaciones en la industria minera*. Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
74. Esab (2000). *Basic Welding Filler Metal Technology*. ESAB. <http://allaboutmetallurgy.com/wp/wp-content/uploads/2017/08/Esab-Welding-Filler-Metal-Technology.pdf>. Consulta en diciembre 2016.
75. Yiyu, Wang. Rangasayee, Kannan and Leijun, Li (2016). “Characterization of as-welded microstructure of heat-affected zone in modified 9Cr–1Mo–V–Nb steel weldment”. *Materials Characterization*. (118): 225-234.
76. Thora, Falkenrecka. Maximilian, Klein and Thomas Böllinghaus (2017). “Dynamic compressive behaviour of weld joints”. *Materials Science & Engineering A* (702): 322-330.
77. R. Ma, K. Fang, J. Yang, X. Liu, H. Fang (2014). “Grain refinement of HAZ in multi-pass welding”. *Journal of Materials Processing Technology* (214): 1131-1135.
78. M. Islam, A. Buijk, M. Rais-rohani, K. Motoyama (2014). Simulation-based numerical optimization of arc welding process for reduced distortion in welded structures. *Finite Elements in Analysis and Design* (84): 54-64.
79. C. Kägeler, M. Schmidt (2010). Frequency-based analysis of weld pool dynamics and keyhole oscillations at laser beam welding of galvanized steel sheets. *Physics Procedia* (5): 447-453.
80. T. Soysal, S. Kou, D. Tat and T. Pasang. (2016). “Macrosegregation in dissimilar-metal fusion welding”. *Acta Materialia* (110):149-160.
81. Corleto, Carlos and Argade, Gaurav (2017). “Failure analysis of dissimilar weld in heat exchanger”. *Case Studies in Engineering Failure Analysis* (9): 27-34.
82. H. Hosseini, M. Shamanian and A. Kermanpur (2016). “Microstructural and weldability analysis of Inconel617/AISI 310 stainless steel dissimilar welds”. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* (14): 418-24.
83. Zapata, Alberto. Marulanda, José y Molina, José (2007). “Recuperación de un molino vertical ATOX 32.5 para molienda de caliza por medio de soldadura”. *Scientia et Technica*, (36): 625-630.
84. Marulanda, José. Cañas, Luz y Barón, Jairo (2017). “Abrasive wear in wear plates and hard coatings applied by welding with shielded electrode”. *Revista Facultad de Ingeniería*. (26): 105-112.

85. Khaled, Metwally. Lubeigt, Emma. Sandrine, Rakotonarivo. Jean-François, Chaix. François, Baqué. Gilles, Gobillot and Serge, Mensah. (2018). "Weld inspection by focused adjoint method". *Ultrasonics* (83): 80-87.
86. American Welding Society (2016). *Evaluación de inspector en soldadura. Part B. Libro de evaluación de especificaciones.* (AWS). Miami.
87. ANSI - Z87.1 (2010). *American National Standard for Occupational and Educational Eye and Face protection Devices.* ANSI.
88. ANSI - ISEA Z89.1. (2014). American National Standard Safety Requirements for Industrial Head Protection. ANSI.
89. OSHA 18001 (2007): *Gestión de seguridad y salud ocupacional.* OSHA.
90. Barrera, Lagos (2016). *Seguridad en los procesos de soldadura.* <http://lagosbarrera.blogspot.com.co/>. Consulta en diciembre 2016.
91. American Welding Society (2012). ANSI/AWS Z49.1: *Safety in Welding, cutting and allied Processes.* (AWS).
92. INDURA (2016). *Manual de sistemas y materiales de soldadura.* www.indura.net. Consulta en noviembre 2016.
93. Lévi, Mikayáh (2011). *Guía del inspector de soldadura.* www.SoldaduraLatinoamerica.com. Consulta en enero 2017.
94. Arévalo, Juan y Caceres, Olmedo (2016). *Tecnología mecánica s.a.* <http://tormeriatecmecpanama.blogspot.com/2013/09/inspeccion-de-soldadura-en-panama.html>. Consulta en enero 2017.
95. American Welding Society (2000). ANSI/AWS B1.11: *Guide for visual examination of welds.* AWS.
96. Otálvaro, Juan (2010). *Elaboración de la documentación para el esquema de certificación de inspectores de soldadura.* Trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira.
97. INDURA (2016). *Códigos, normas y especificaciones.* <http://es.scribd.com/doc/43554436/La-Soldadura>. Consulta en enero 2017.
98. Villacrés, Christian (2009). *Implementación de un sistema de inspección para control de calidad de soldadura en estructura metálica con el uso de ensayos no destructivos para la empresa INENDEC.* Sangolquí.
99. American Welding Society (2016). *AWS QC1: Standard for. AWS Certification of Welding Inspectors.* AWS.
100. Gómez, Carlos (2013). "Programas de certificación de la AWS". *Welding Journal en español.* 44-47.
101. American Welding Society (1993). *AWS QC2: Recommended Practice for the Training, Qualification and Certification of Welding Inspector Specialist and Welding Inspector Assistant.* AWS.
102. American Welding Society (2013). *ANSI/AWS B5.1: Specification for the qualification of welding inspectors.* AWS.
103. American Welding Society (2015). *AWS D1.1/D1.1M: Structural Welding Code-Steel.* AWS.
104. American Welding Society (2014). *AWS D1.2/D1.2M: Structural Welding Code-Aluminum.* AWS.
105. American Welding Society (2008). *AWS D1.3/D1.3M: Structural Welding Code-Sheet Steel.* AWS.
106. American Welding Society (2011). *AWS D1.4/D1.4M: Structural Welding Code-Reinforcing Steel.* AWS.
107. American Welding Society (2015). *AASHTO/AWS D1.5M/D1.5: Bridge Welding Code.* AWS.
108. American Welding Society (2017). *AWS D1.6/D1.6M: Structural Welding Code-Stainless Steel.* AWS.
109. American Welding Society (2012). *AWS D9.1M/D9.1: Sheet Metal Welding Code.* AWS.
110. American Society of Mechanical Engineers (2013). *Selecting applicable B31 piping code sections.* ASME. <http://cstools.asme.org/csconnect/pdf/CommitteeFiles/22855.pdf> Consulta en abril 2017.
111. American Society of Mechanical Engineers (2015). *Boiler and pressure vessel code (BPVC).* ASME.
112. American Society of Mechanical Engineers (2015). *ANSI/ASME B31.1 Power Piping.* ASME.
113. American Society of Mechanical Engineers (2010). *ANSI/ASME B31.3. Process piping.* ASME.

114. American Society of Mechanical Engineers (2009). *ANSI/ASME B31.4. Pipeline transportation systems for liquid hydrocarbons and other liquids*. ASME.
115. American Society of Mechanical Engineers (2016). *ANSI/ASME B31.5. Refrigeration piping and heat transfer components*. ASME.
116. American Society of Mechanical Engineers (2012). *ANSI/ASME B31.8. Gas Transmission and Distribution Piping System*. ASME.
117. American Society of Mechanical Engineers (2011). *ANSI/ASME B31.9. Building Services Piping*. ASME.
118. American Society of Mechanical Engineers (2002). *ANSI/ASME B31.11. Slurry transportation piping systems*. ASME.
119. American Petroleum Institute (2015). *API Standard 1104. Welding of Pipelines and Related Facilities*. API.
120. American Petroleum Institute (2016). *API Standard 650. Welded Steel tanks for oil storage*. API.
121. American Petroleum Institute (2016). *API Standard 653. Tanks inspection, repair, alteration and reconstruction*. API.
122. American Petroleum Institute (1963). *API PSD 2201. Welding or hot tapping on equipment containing flammables*. API.
123. Mazur, Magdalena (2017). "Assessment of the construction welding process". *Procedia Engineering* (192): 580 - 585.
124. Organización Internacional de Normalización (2015). *Sistemas de gestión de la calidad. ISO 9001*. ISO.
125. Organización Internacional de Normalización (2007). *Requisitos de calidad para el soldeo por fusión de materiales metálicos. EN-ISO 3834*: ISO.
126. American Welding Society (2012). *ANSI/AWS A5.1./A5.1M 2012. Specification for carbon steel electrode for shielded metal arc welding*. AWS.
127. Luna, Rene y Gómez, Carlos (2015). "Influencia de los parámetros de la soldadura metálica fría en las aleaciones AA5083 y AA6061". *Ingeniería Mecánica*. (18):1.
128. Niebles, Enrique y Arnedo, William (2009). "Procedimientos de Soldadura y Calificación de Soldadores: una Propuesta de Enseñanza y Guía de Aplicación para la Industria". *Información Tecnológica* (20): 19-30.
129. American Society of Mechanical Engineers (2016). *Sección IX del Código de Calderas y Recipientes Sujetos a Presión. Qualification standard for Welding and brazing procedures, welders, brazers and Welding and brazing operators*. <https://law.resource.org/pub/us/code/ibr/asmе.bpvc.ix.2010.pdf>. Consulta en enero 2017.
130. Norma Técnica Colombiana (2001). *NTC - 2057 Norma Técnica Colombiana para calificar el procedimiento de soldadura y la habilidad del soldador*. NTC.
131. Arias, Juan y Guanuchi, Andres (2011). *Implementación de un programa para la calificación de inspectores de soldadura*. Escuela politécnica nacional. Quito.
132. American Welding Society (2008). *Visual Inspection Workshop, Reference Manual*. AWS. Miami.
133. Organización Internacional de Normalización (2012). *Especificación y cualificación de los procedimientos de soldeo para los materiales metálicos PN-EN ISO 15614*. ISO.
134. Ruiz, Paola (2013). *Calidad en la soldadura: Inspección y detección con ensayos no destructivos*. <https://johnguio.files.wordpress.com/2013/11/artc2a1culo-calidad-en-la-soldadura-end.pdf>. Consulta en enero 2017.
135. ASTM (2016). *Designation E384: Standard Test Method for Microhardness of Materials*. ASTM.
136. ASTM (2017). *Designation E18: Standard Test Method for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials*. ASTM.

137. ANSI/ASNT (2016). *Recommended Practice No. SNT-TC-1A. ASNT Standard Topical Outlines for Qualification of Nondestructive Testing Personnel (ANSI/ASNT CP-105-2011)*. ANSI.
138. Hellier, Charles (2012). *Handbook of Nondestructive Evaluation*. Second Edition. McGraw Hill.
139. Magnaflux (2002). *Manual de uso de líquidos penetrantes*. Sager. Bogotá.
140. Olympus (2016). *EPOCH 600 Detectores de defectos*. <http://www.olympus-ims.com/es/pdf-library/157-catId.268435483.html>. Consulta en enero 2017.
141. Suárez, Carlos (2011). “Inspección de soldaduras empleando el ensayo de ultrasonido en lugar de radiografía”. *Tecnicontrol S.A.* <http://portal.tc.com.co/tecnicontrol/images/publicaciones/articulos/EmpleodeUTenlugardeRT.pdf>. Consulta en enero 2017.
142. American Society of Mechanical Engineers (2017). *ASME Sección V. Examen por ensayos no destructivos. Subsección A: Métodos de ensayos no destructivos*. ASME.
143. Olympus (2016). Solución de inspección de soldaduras por ultrasonido. <http://www.olympus-ims.com/es/automated/pv/>. Consulta en enero 2017.
144. High tech servicios (2016). *Inspección juntas soldadas y soldaduras tanques*. <http://www.hightech.net.ve/servicios/1-ensayos-no-destructivos/phased-array>. Consulta en enero 2017.
145. Suarez, Carlos (2013). *Inspección mediante phased array/TOFD según la última versión ASME SEC V. 8ª jornada andina de ductos*. ACIEM. Bogotá.
146. American Welding Society (2010). *A 3.0. Términos y definiciones*. AWS. Miami.
147. Urbán, Pascual (2009). *Construcción de estructuras metálicas*. Editorial club universitario. Alicante.
148. Pérez, Marta (2009). *Diseño y cálculo de la estructura metálica y de la cimentación de una nave industrial*. Universidad Carlos III de Madrid. Madrid.
149. Norma de sismo resistencia - NSR 10 (2010). *Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente. Capítulo F, Estructuras metálicas*. Asociación Colombiana de ingeniería sísmica. Bogotá.
150. Instituto técnico de la estructura en acero (2017). *Diseño de uniones*. (ITEA). España. <http://www.ingenieriarural.com/Acero/Textos/TOMO13.pdf>. Consulta en marzo 2017.
151. Pérez, José (2011). *Diseño y cálculo del bastidor de un vehículo cosechador de fresas*. Trabajo de grado. Universidad de Sevilla. Sevilla.

Los procesos de soldadura requieren de conocimientos en diferentes áreas que van desde materiales, metalurgia, diseño e ingeniería de equipos y estructuras, como también de fabricación, montaje, mantenimiento, inspección y gestión de calidad. Por lo anterior, es muy importante potenciar el recurso humano en soldadura, ya que los proyectos de ingeniería han aumentado notablemente en cuanto a tamaño y cantidad, incrementando la demanda de profesionales calificados en el diseño, construcción, control e inspección de estructuras y componentes soldados. La soldadura es fundamental en el desarrollo de grandes proyectos que necesitan del proceso de unión, de modo que estas uniones queden en excelente estado y puedan competir y satisfacer las necesidades del mercado colombiano y de otros países. Los códigos, normas, especificaciones y procedimientos de soldadura son herramientas muy necesarias que se deben seguir para una buena aplicación de soldadura, dado que aumenta la confiabilidad y se asegura calidad en el producto terminado. La inspección de soldadura se realiza para determinar y asegurar el estado y la calidad de la unión soldada durante la fabricación, montaje y reparación de equipos, estructuras e instalaciones, además de comprobar que los ensambles soldados satisfagan los requerimientos de la normatividad aplicable y que estén de conformidad con los requerimientos del cliente y lo establecido en códigos, normas y especificaciones de soldadura. En la calidad de la soldadura intervienen varios factores como los económicos, seguridad, normatividad, regulaciones gubernamentales, competencia laboral y el empleo de diseños menos conservativos, esto hace que haya muchas personas involucradas en la creación de un producto soldado de calidad, por tal motivo, no hay un único responsable en la obtención de una soldadura confiable. Este libro pretende aportar en el conocimiento básico de la soldadura y cómo se debe realizar una inspección de una unión soldada y cuáles son los pasos a seguir antes, durante y después de realizar una soldadura; para que ingenieros y profesionales afines puedan tener un mejor conocimiento de las juntas soldadas, dejando clientes satisfechos e instalaciones seguras.