

**ESTADO DEL ARTE DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA INVOLUCRADOS
EN EL MONTAJE DE TUBERÍA API 5 L PARA TRANSPORTE DE
HIDROCARBUROS.**

OSCAR GUILLERMO WALTEROS RODRIGUEZ

**UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA
DEPARTAMENTO DE POSTGRADOS
ESPECIALIZACIÓN DE SOLDADURA
BOGOTÁ, COLOMBIA
2012**

**ESTADO DEL ARTE DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA INVOLUCRADOS
EN EL MONTAJE DE TUBERÍA API 5 L PARA TRANSPORTE DE
HIDROCARBUROS.**

OSCAR GUILLERMO WALTEROS RODRIGUEZ

**MONOGRAFÍA
PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE ESPECIALISTA EN SOLDADURA**

ASESOR: INGENIERO HECTOR FERNANDO ROJAS



**UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA
DEPARTAMENTO DE POSTGRADO
ESPECIALIZACIÓN DE SOLDADURA
BOGOTÁ, COLOMBIA
2012**

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

20 de Enero de 2012

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. ANTECEDENTES.....	8
2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	9
3. JUSTIFICACIÓN.....	11
4. OBJETIVOS	12
4.1 OBJETIVO GENERAL	12
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
5. DELIMITACIÓN DEL PROYECTO.....	13
6. MARCO REFERENCIAL	14
6.1 MARCO TEÓRICO	14
6.2 MARCO CONCEPTUAL	37
7. MARCO METODOLÓGICO	39
7.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	39
7.2 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	39
7.3 MARCO LEGAL Y NORMATIVO	39
8. ANÁLISIS Y RESULTADOS	43
8.1 DESARROLLO DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA.....	43
8.2 ESTUDIO DE LA INFORMACIÓN	43
8.2.1 INICIOS CONSTRUCTIVOS EN OLEODUCTOS ESPAÑOLES.....	44
8.2.2 ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A LA CORROSIÓN EN PROCESOS CONVENCIONALES PARA OLEODUCTOS.....	45
8.2.3 ANÁLISIS DE LA ENERGÍA CALORÍFICA DURANTE LA REPARACIÓN EN SERVICIO DE TUBERÍAS PARA OLEODUCTOS.....	48
8.2.4 EVALUACIÓN DE PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA MANUAL Y SEMIAUTOMÁTICOS EN ACEROS MICROALEADOS PARA LÍNEAS DE TRANSPORTE.....	50
8.2.5 DESARROLLO EN LOS ESTUDIOS COMPARATIVOS DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA MANUALES Y SEMIAUTOMÁTICOS EN OLEODUCTOS.....	53
8.2.6 DESARROLLO EN LOS ESTUDIOS COMPARATIVOS DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA MANUALES Y SEMIAUTOMÁTICOS EN OLEODUCTOS - 2ª PARTE.....	56
8.2.7 DESARROLLO EN LOS ESTUDIOS COMPARATIVOS DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA MANUALES Y SEMIAUTOMÁTICOS EN OLEODUCTOS - 3ª PARTE.....	59
8.2.8 EL PROCESO DE ALAMBRE TUBULAR EN AMBIENTES CORROSIVOS DE H ₂ S EN JUNTAS SOLDADAS DE ACERO API 5L - X80.....	63

8.2.9	PROCEDIMIENTO CALIFICADO DE PROCESO FLUX CORED ARC WELDING (FCAW) MEDIANTE TRANSFERENCIA PULSADA.....	66
8.2.10	NUEVOS PROCESOS DE SOLDADURA IMPLEMENTABLES EN LA CONSTRUCCION DE GASODUCTOS.....	70
9.	CONCLUSIONES.....	74
10.	BIBLIOGRAFÍA	76

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1 – Parámetros recomendados para alambres de soldadura de arco sumergido SAW.....	20
Tabla 2- Electrodo para GTAW.....	24
Tabla 3 – Mezclas de gases más comunes para el proceso GMAW.	30
Tabla 4 – Recomendaciones generales para aplicaciones de gases en PAW.....	36
Tabla 5 – Composición química en cada uno de los niveles y grados de tubería API 5L.....	38
Tabla 6 - Códigos, estándares y normas Internacionales en Oleoductos y Gasoductos aplicables en Colombia.	40
Tabla 7– Códigos, estándares y normas Nacionales aplicables en Oleoductos y Gasoductos Colombia.	42
Tabla 8 – Composición química y propiedades mecánicas del acero API 5L X52.	46
Tabla 9 – Tipos de juntas experimentales.	46
Tabla 10 – Resultados de las curvas de polarización de la figura 16.....	47
Tabla 11 – Composición química y propiedades de los metales base.	50
Tabla 12 – Identificación de las probetas para ensayos de soldabilidad Tekken.	51
Tabla 13 – Designación de las muestras soldadas.....	53
Tabla 14 – Resultado del ensayo de dureza para las muestras soldadas con SMAW. ...	54
Tabla 15 – Resultado del ensayo de dureza para las muestras soldadas con GMAW...	54
Tabla 16 – Composición química y carbono equivalente Metales Base.....	57
Tabla 17 – Resultados del Ensayo BEAD BEND TEST.....	58
Tabla 18 - Composición química (% en peso) y propiedades mecánicas del acero API 5L - X80.....	63
Tabla 19 – Agrietamiento inducido por el hidrogeno. Probetas soldadas sin precalentamiento.....	65

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 - Red de principales oleoductos de Colombia 2010.	9
Figura 2 - Representación esquemática del proceso SMAW durante su ejecución.....	16
Figura 3 - Representación esquemática del proceso SAW, a la derecha aplicación en tuberías	18
Figura 4 – Esquema del proceso GTAW.	23
Figura 5 - Esquema del proceso GMAW	25
Figura 6 – Esquema de los tipos de transferencia metálica en función del amperaje. ...	27
Figura 7- Transferencia SPRAY en el proceso GMAW.....	28
Figura 8 - Transferencia GLOBULAR en el proceso GMAW.....	28
Figura 9 - Transferencia Corto Circuito en el proceso GMAW.	29
Figura 10 – Comportamiento del voltaje y amperaje durante la transferencia por Corto Circuito.....	29
Figura 11 - Esquema del proceso FCAW autoprotegido.	32
Figura 12 - Esquema del proceso FCAW con protección externa gaseosa.	32
Figura 13 – Esquema de trabajo en el proceso PAW.	35
Figura 14 – Esquema del Proceso de Oxigás.....	37
Figura 15 – Planta del Oleoducto Málaga-Puertollano.....	44
Figura 16 – Resumen de las curvas de polarización de las juntas y metal base.....	47
Figura 17 – Tubo reforzado y sección seleccionada para la creación del modelo de elementos finitos.	48
Figura 18 – Nomograma para la determinación del aporte térmico para garantizar una $T_{max} < 982^{\circ}C$, sin emplear precalentamiento del tubo.....	49
Figura 19 – Resultados del ensayo de tracción.	52
Figura 20 - Microdureza de las distintas zonas de la junta soldada. A: Acero HIC, B: Acero NOR.....	52
Figura 21 – Proceso de limpieza de la junta.	54
Figura 23 – Modelo de extracción de la probetas para ensayo Charpy – V.	60
Figura 22 – Esquema de la probeta de ensayo Tekken utilizada.	59
Figura 24 – Energías absorbidas vs. Temperatura de ensayo para el metal de soldadura.	61
Figura 25 – Superficie de fractura para la ZAC de las probetas obtenidas para la soldadura SAN, ver probetas en tabla 12 [19].	61
Figura 26 – Energías absorbidas vs. Temperatura de ensayo para la ZAC.	62
Figura 27 - Superficie de fractura para el metal de soldadura de las probetas obtenidas para la soldadura SAN, ver probetas en tabla 12 [19].....	62
Figura 28 – Bloque de ensayo G-BOP.....	64
Figura 29 – Representación esquemática de la célula de corrosión usada para evaluar las grietas inducidas por el hidrogeno en presencia de H_2S (NACE TM0284).	65
Figura 30 – Macrografías de las fracturas de los cordones de soldadura. A) Probeta soldada con el alambre E71T8-K6 a temperatura ambiente. B) Probeta soldada con el alambre E71T8-K6 precalentada a $100^{\circ}C$	66
Figura 31 – Esquema de las fuerzas que actúan en la transferencia metálica FCAW. A) Gota ligada físicamente a la cascara metálica, B) Gota ligada a la protección gaseosa.	67
Figura 32 – Grafico del criterio de Burnoff para soldadura convencional y por arco pulsado.....	69

Figura 33 – Vista de las instalaciones portuarias del proyecto LNG en Pampa Melchorita – Perú.....	71
Figura 34 – Ciclo modificado de cortocircuito que describe el funcionamiento RMD.....	72
Figura 35 – Imágenes de la aplicación de RMD en un proyecto de pilotaje en Brasil. ...	72
Figura 36 – SAW para el relleno y acabado girando sobre rodillos viradores “turning rolls” para el shop welding.....	73

INTRODUCCION

En la industria Colombiana de Petróleo & Gas actualmente, el crecimiento en exploración, producción y transporte proyectan una meta de 1300 KBPED (Miles de Barriles de Petróleo Equivalente) exportables para el año 2020, para llevar a cabo este ambicioso plan liderado por la empresas petroleras del país se requiere llevar a cabo una actualización en los procesos de soldadura aplicables, no solo en los campos exploratorios y en las facilidades de producción, también se requiere una ampliación y mejora en las redes de los oleoductos y gasoductos para poder evacuar todo el crudo desde el centro del país.

El presente documento refleja el estado actual de los procesos de soldadura aplicables e involucrados en el montaje de tubería API 5 L para transporte de hidrocarburos a nivel mundial, de forma que permite conocer el estado del arte en Colombia y llegar a involucrar otros que han sido implementados en otras regiones del mundo. Al finalizar la revisión del estado del arte, el documento permitirá conocer los procesos de soldadura que mejoran la eficiencia en la construcción y la calidad de los sistemas de transporte proyectados para cumplir con la demanda actual de crudo en Colombia a ser transportado.

1. ANTECEDENTES

En la cadena logística del negocio de la industria de Petróleo & Gas, la entrega del producto al cliente final, se hace por medio del transporte a través de oleoductos desde los campos de producción hasta los puertos o las refinerías, este “eslabón” en la cadena se ha convertido en un punto de gran importancia que afecta las capacidades nacionales de producción y exportación.

El estado actual de la industria petrolera nacional evidencia¹ una capacidad de producción mayor que la capacidad de transporte por oleoducto, dando como resultado volúmenes de crudo no comercializados o transformados (refinados), generando pérdidas en las empresas productoras por no poder comercializar estos volúmenes represados.

Durante el montaje de las tuberías para los oleoductos que transportan los hidrocarburos producidos en la industria del Petróleo & Gas, *los procesos de soldadura* asociados son un factor de vital importancia para las empresas de Montaje (construcción) y también para las empresas contratantes, debido a los diferentes factores que pueden ser medidos, y que en últimas definen la eficiencia, costo, calidad y tiempo de entrega del proyecto o producto (oleoductos).

Como requisito en el montaje y construcción de los oleoductos, los procesos de soldadura y materiales usados deben cumplir con los requerimientos citados en los estándares y normas de calidad para el transporte de hidrocarburos en tuberías, entre otros API 1104, ASME B31.4 y B31.8.

En Colombia por muchos años y siguiendo paralelamente el desarrollo histórico de los procesos de soldadura a nivel global, se observa en los montajes y fabricaciones de sistemas de tubería actuales que el proceso de soldadura SMAW es el de mayor uso y aplicación por su flexibilidad operativa y fácil consecución de consumibles (electrodos revestidos)².

Este proceso aunque presenta las ventajas anteriormente citadas, implica de varios cordones de relleno según el espesor a soldar, y si se aplica en tuberías de transporte de diámetros mayores a 20”, generan un tiempo de aplicación excesivo, de manera tal que se requiere aumentar el número de soldadores por junta.

Para los nuevos sistemas de transporte de hidrocarburos en Colombia [2], la tendencia de fabricación y construcción de oleoductos bajo este proceso parece cambiar con la velocidad de construcción requerida para el transporte de los hidrocarburos, de manera tal que se cumpla con la demanda de crudo a exportar proyectada para el año 2020.

¹ http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta_petrolera124/transporte.htm

² Chu, W. H. (2004). *Automatización SMAW mediante control Fuzzy para controlador PID con ganancia programada*.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Dado el auge y crecimiento de la explotación, producción, transporte y almacenamiento de Crudo y otros productos como Gas en Colombia, y observando el estado actual de la red de oleoductos en el país (véase **figura 1**), se presenta en la actualidad un déficit en la capacidad de transporte en los oleoductos nacionales³.

La infraestructura instalada de oleoductos en Colombia, actualmente se ha quedado sin la capacidad en volumen y caudal para el transporte de crudo, represando grandes cifras de Barriles por día en los campos de producción del interior del país. Esto ha llevado a empresas como Ecopetrol, Pacific Rubiales y Petrominerales, entre otros, a unirse y buscar la forma de responder a esta necesidad.

Figura 1 - Red de principales oleoductos de Colombia 2010.



Fuente: OCENSA

Un ejemplo claro es la creación de BICENTENARIO, una empresa aliada y conformada por los productores de petróleo en el país, creada para desarrollar un programa de evacuación de Crudos desde el centro del país, que permita transportar estos hidrocarburos represados y que responda a la demanda de producción de Petróleo en Colombia.

³ http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta_petrolera124/transporte.htm

Esta alianza entrego como resultado al programa de evacuación, un proyecto que consiste en la construcción de un nuevo oleoducto llamado “Bicentenario de Colombia” paralelo al hoy existente oleoducto de “Caño Limón – Coveñas”, el cual se ha quedado sin capacidad de transportar la nueva demanda de hidrocarburos desde el centro del país, originada por la explotación de los crudos pesados en los llanos orientales.

La construcción de este nuevo oleoducto, implica el montaje de más de 200 Km en tubería API 5L Grado X-70 de 42” de diámetro (0,688” de espesor), y el montaje de más de 60 Km de tubería de 36” de diámetro (0,75” de espesor) y 70 Km de tubería de 30” de diámetro (0,875” de espesor)⁴.

Este claro ejemplo y otros nuevos proyectos a futuro, requieren de la implementación de nuevos procesos de soldadura más eficientes al ya convencional SMAW usado en la mayoría de montajes de tubería en el país.

La eficiencia de cada proceso dependerá de muchos factores como la composición química (definida por la calidad de la tubería), el espesor, la zona de trabajo (ubicación del montaje), el grado de automatización, la habilidad del operario, los consumibles y su disponibilidad, entre otros, determinando la adecuada selección del proceso de soldadura con el propósito de cumplir con los requerimientos de cada proyecto.

⁴ <http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta127/filiales.htm>

3. JUSTIFICACIÓN

Esta nueva realidad de la industria Petrolera Colombiana, ha llevado a las empresas a pensar en nuevas condiciones de operación, de tuberías y sistemas más robustos, y a trabajar con nuevos procesos de soldadura que respondan a la calidad, tiempos de entrega y condiciones de trabajo para el lugar donde se realice el montaje del sistema de transporte (oleoducto).

De esta manera surge la necesidad de obtener una revisión del estado del arte que permita conocer los diferentes procesos de soldadura implicados en la construcción y montaje de tubería para el transporte de los hidrocarburos producidos por la explotación Petrolera en el país, de manera tal que las empresas de Montaje de Tubería puedan posteriormente evaluar, revisar, conocer, manejar e implementar los nuevos procesos de soldadura que permitan responder a la demanda generada en el mercado de la industria de Petróleo & Gas.

Una revisión bibliográfica o del estado del arte de los procesos de soldadura en este campo, podría responder preguntas como:

- ¿Cuál es la situación actual de la industria del Petróleo & Gas en procesos y tecnologías de soldadura para el montaje de tubería API 5L usada para el transporte de crudo en la industria de Hidrocarburos?
- ¿Qué nuevos procesos de soldadura se pueden implementar en el montaje y construcción de tubería API 5L, para sistemas de transporte de hidrocarburos en la industria del Petróleo y el Gas?
- ¿La calidad de los procesos encontrados en la revisión bibliográfica y su implementación en el país, son aceptables?

La búsqueda de las respuestas a estas preguntas constituye la base y el motivo de la presente revisión del estado del arte.

Al contar con esta revisión de los procesos de soldadura, se podrán evidenciar las ventajas y desventajas frente a las tecnologías desarrolladas en los equipos y procesos, obteniendo una herramienta y base académica que les permita mejorar la productividad, disminuir costos y simplificar procesos, obteniendo al interior de sus proyectos el cumplimiento en los cronogramas, la calidad y satisfacción del cliente.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar una Revisión del Estado del Arte de los Procesos de Soldadura involucrados en el montaje de tubería API 5 L para transporte de hidrocarburos.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Reconocer la situación actual de la industria del Petróleo & Gas respecto a los procesos de soldadura usados en el transporte de hidrocarburos.
- Establecer que nuevos procesos de soldadura se pueden implementar en el montaje de tuberías de transporte para hidrocarburos de la industria del Petróleo & Gas.
- Identificar si los nuevos procesos y tecnologías de soldadura, son de fácil implementación y cumplimiento con los requerimientos de la industria del Petróleo & Gas.

5. DELIMITACIÓN DEL PROYECTO

El trabajo investigativo tiene su inicio con el desarrollo de la ingeniería para la construcción del Oleoducto Bicentenario, en donde se requiere la implementación de procesos de soldadura alternos al convencional SMAW, mejorar la eficiencia en la aplicación por junta para tubería API 5L Grado X-70 de 30 a 42" de diámetro en espesores mayores a 0,5" de esta manera, poder cumplir con los cronogramas del proyecto y poder transportar el crudo desde el interior del país hacia la terminal de Coveñas.

La revisión bibliográfica se limitara solamente a procesos de soldadura relacionados al montaje y construcción de oleoductos, poliductos, gasoductos y tuberías de transporte de hidrocarburos en general (códigos ASME B31.4 y B31.8).

Así mismo la revisión bibliográfica se limitara a tuberías de calidad API 5L, esto es tubería en Acero al Carbón de diferentes grados de resistencia y en los espesores comercializados en la industria de Petróleo y Gas. No hace parte del alcance de esta revisión bibliográfica, el estado del arte correspondiente a los procesos de soldadura longitudinal o helicoidal en la fabricación de la tubería.

El estado del arte en procesos de soldadura, no definirá a las empresas de Montaje y Construcción de Tubería que proceso seguir en sus montajes de oleoductos, pero si será una guía para poder evaluar, conocer, manejar e implementar nuevos procesos en su institución.

6. MARCO REFERENCIAL

6.1 MARCO TEÓRICO

De acuerdo a lo descrito en los códigos ASME B31.4 “Sistemas de tubería de transporte para hidrocarburos y otros líquidos” en el ítem 434.8.1 y ASME B31.8 “Sistemas de tubería de transporte y distribución de Gas” en el ítem 823.21, los procedimientos de soldadura y los soldadores que efectúen el montaje y la construcción de la tubería deberán estar clasificados y calificados bajos el código ASME Sección VIII Recipientes y Calderas a presión, ASME IX y API 1104.

Este último el estándar API 1104 “Facilidades relacionadas con la Soldadura de Tuberías” cubre la soldadura en tuberías de acero al Carbón, acero de baja aleación, aplicado en juntas a tope, filete, socket, para ser usado en los procesos de explotación, deshidratación, refinación y transporte en la industria de Petróleo y Gas. Los procesos de soldadura aplicables en las facilidades relacionadas anteriormente, pueden ser realizados en forma manual, semiautomática, mecánica, automática o la combinación de ellos, del mismo modo la soldadura puede ser aplicada en posición fija, rotada o la combinación de ambas.

A continuación se listan y describen los procesos de soldadura aplicables a los sistemas descritos en el código ASME B31.4 y B31.8, según lo estipulado en el estándar API 1104:

1. SMAW – Shielded Metal Arc Welding:

El proceso de soldadura SMAW, por muchos años, ha sido una de las técnicas más comúnmente aplicadas en la fabricación de estructuras de acero. Es también conocido como Soldadura Manual por arco con Electrodo Revestido, del inglés Manual Metal Arc (MMA). En la industria de fabricación del Reino Unido (UK), se conoce como Stick Welding (Soldadura de Soporte)⁵.

De la gama de procesos de soldadura, el proceso SMAW es uno de los más ampliamente utilizados. Si bien los fabricantes continúan automatizando los procesos (por aquellos de alambre continuo) para incrementar la productividad a causa del tiempo muerto usado para reemplazar el electrodo una vez consumido, SMAW se mantiene en gran parte del total de los negocios de la construcción, ya sea en aplicaciones estructurales o en reparaciones en aceros inoxidables u ordinarios, y metales no ferrosos.

El proceso SMAW se utiliza por su versatilidad, bajos costos de accesorios y consumibles, la simplicidad de la fuente de potencia, bajos costos de mantenimiento, durabilidad, relativa simplicidad de operación y fácil configuración⁶ en una amplia gama de aplicaciones, tanto en taller, como a pié de obra en la soldadura de materiales de espesores superiores a 1,5 mm. Los sectores de mayor aplicación son la construcción naval, de máquinas, estructuras, tubería para manejo de petróleo, tanques y esferas de

⁵ Norrish, J. (1992). *Advanced Welding Proceses. New Manufacturing Processes and Materials Series*. Philadelphia, New York: IOP Publishing LTD.

⁶ Chu, W. H. (2004). *Automatizacion SMAW mediante control Fuzzy para controlador PID con ganancia programada*.

almacenamiento, puentes, recipientes a presión y calderería. Es usado también en trabajos de reparación y mantenimiento, sumado a la existencia de la necesidad de concretar producciones y recuperaciones unitarias de piezas complejas y realizar trabajos en lugares inaccesibles para el equipamiento automático, dada la robustez, adaptabilidad y simplicidad del equipamiento unido a sus bajos costos de mantenimiento, junto a otras características tratadas anteriormente, sostienen la amplia diseminación de este proceso a nivel mundial.

La selección de los electrodos tiene una influencia decisiva en la calidad y el costo de la soldadura, esta selección de uno entre varios electrodos homólogos se observa con *el proceso de homologación de electrodos* basado en la certificación de las pruebas establecidas por la norma contra la que se desea homologar. La especificación ANSI/AWS A5.1⁷, por ejemplo, clasifica los electrodos revestidos en cuanto a: tipo de corriente, tipo de revestimiento, posiciones de soldadura, propiedades mecánicas y químicas del metal recién soldado y envejecido.

Generalidades del proceso.

El proceso SMAW se inicia mientras, en presencia de una diferencia de voltaje entre la punta metálica del electrodo y la pieza de trabajo, es cortocircuitada el alma metálica del electrodo revestido con la pieza a soldar; produciéndose al paso de la corriente el calentamiento por efecto Joule del metal de la punta del electrodo y sus óxidos, que permite la emisión electrónica y la aparición de un flujo de electrones.

Producto de las altas temperaturas alcanzadas durante este proceso, las sustancias componentes del revestimiento son descompuestas en gases, que junto a los vapores del metal del alma pueden ionizarse para establecer un plasma térmico, que produce suficiente energía como para unir metales por fusión.

El material fundido de la punta del electrodo aporta gotas, que atraviesan el arco hasta ingresar al baño fundido, que una vez solidificado bajo la capa de escoria, constituirá el cordón de soldadura. La atmósfera gaseosa que protege el arco evita la oxidación y la nitruración a altas temperaturas del metal depositado y la capa de escoria protege al metal fundido y contribuye a desulfurar y desfosforar el mismo, lo cual eleva las propiedades mecánicas del depósito.

Durante el proceso (**figura 2**) se producen pérdidas metálicas por salpicadura, que atentan contra la economía del proceso, despidiéndose además gases y radiaciones perjudiciales para la salud⁸.

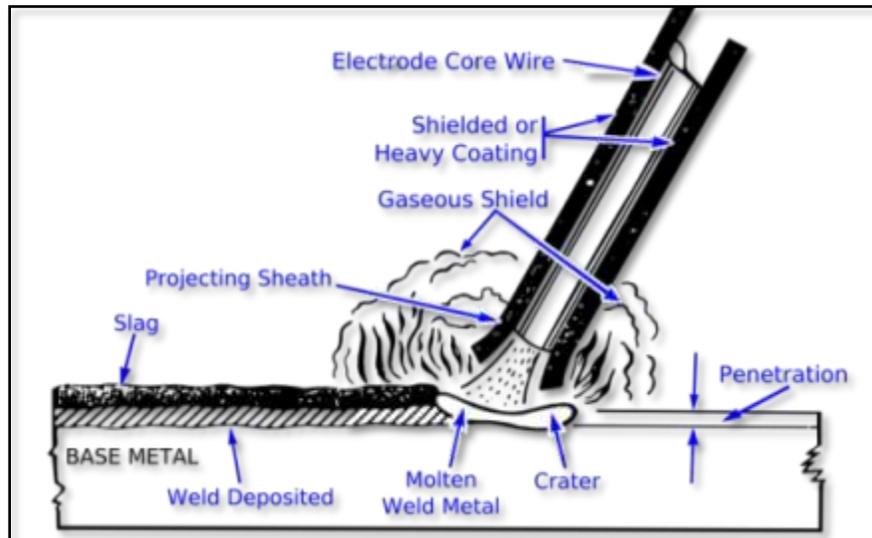
El proceso puede efectuarse utilizando fuentes de corriente directa y alterna. La estabilidad del arco es más crítica en la soldadura con corriente alterna debido a la inversión de la polaridad a razón de ciento veinte veces por segundo, lo que provoca extinciones y reencendidos sucesivos del arco. La fuente debe tener una característica descendente, donde el voltaje cae mientras se incrementa la corriente de soldadura y

⁷ AWS, A. I. (1991). *Specification for carbon steel electrodes for Shielded Metal Arc Welding, Standard 5.1 - 91*. Miami Florida: American National Standards Institute / American Welding Society.

⁸ Cary, H. (1996). *Modern Welding Technology 3th. edition*.

viceversa, lo que produce la autorregulación del punto de operación cuando se suelda manualmente.

Figura 2 - Representación esquemática del proceso SMAW durante su ejecución.



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:SMAW_weld_area.svg

Durante el proceso de fusión del electrodo, el metal se funde a una temperatura inferior a la del revestimiento, aproximadamente a 1535 grados Celsius para el acero. El revestimiento presenta una temperatura de fusión superior a la del alma metálica, debido a su contenido de materiales refractarios, fundiéndose con cierto retraso debido a la distribución de las isotermas alrededor del arco. Esta diferencia origina la presencia de la llamada “copa” del electrodo (entre la punta del electrodo y el charco de soldadura)⁹.

Ayudado por el mencionado proceso de autorregulación proporcionado por la característica de la fuente, el operador debe mantener proporcionalmente la velocidad de alimentación del electrodo respecto a la velocidad de fusión del mismo, así como una velocidad de soldadura constante para lograr una adecuada apariencia del cordón. La soldadura manual requiere diferentes grados de destreza del operador para distintas posiciones de soldadura, las posiciones vertical y sobre-cabeza, son las más exigentes.

Función eléctrica del revestimiento.

La composición, el origen, la dosificación y el tratamiento de las sustancias utilizadas en la fabricación del revestimiento de los electrodos, desempeña una función fundamental en la soldadura SMAW. Para el revestimiento se suelen utilizar hasta cuarenta minerales y sustancias distintas, como arena de zirconio, rutilo, celulosa, caolín, mármol, polvo de hierro, FeSi, FeTi, FeMn, etc¹⁰.

⁹ García, A. R. (1998). Consideraciones sobre Soldadura Manual con Electrodo Revestido. pag 7.

¹⁰ IBÍD.

La composición de los revestimientos suele ser muy compleja, generalmente se emplea una mezcla de sustancias orgánicas y minerales. En la fabricación de la pasta para el revestimiento, suelen intervenir óxidos naturales: óxidos de hierro, ilmenita (50 por ciento óxido férrico y 50 por ciento óxido de titanio), sílice (óxido de silicio); silicatos naturales (caolín, talco, mica, feldespato, etc.), productos volátiles (celulosa, serrín, etc.), fundentes (fluorita), concentrados (carbonatos, óxidos (óxido de titanio)), ferroaleaciones (FeMn, FeSi, FeTi), aglomerantes (silicato sódico, silicato potásico)¹¹.

Las características de las sustancias del revestimiento posibilitan la ocurrencia de distintos fenómenos de naturaleza eléctrica, física y metalúrgica. La función eléctrica del revestimiento permite el encendido, reencendido y mantenimiento del arco, primeramente al disminuir el trabajo de extracción de los electrones al metal del electrodo, y luego, al aportar sustancias que se descomponen en gases de bajo potencial de ionización y, a la vez, no fácilmente dissociables, pues la disociación es un proceso endotérmico que tiende a consumir calor y dificultar el encendido y mantenimiento del arco eléctrico.

La estabilidad del arco depende, entre otros factores, del estado de ionización de los gases comprendidos entre el ánodo y el cátodo, así como de la temperatura existente en el espacio interelectrónico. Para un arco en corriente alterna es imprescindible un medio fuertemente ionizado. Por este motivo se añaden al revestimiento, entre otras sustancias, compuestos con elementos de bajo potencial de ionización, tales como óxidos y sales de sodio y de potasio. El arco se apaga en cada semiciclo de la señal requiriendo reencenderse 120 veces por segundo cuando se suelda con corriente alterna.

Durante el tiempo que permanece apagado el arco, la temperatura disminuye proporcionalmente a la cantidad de partículas ionizadas, disminuyendo la conductividad eléctrica del plasma, por lo que la emisión electrónica debe reanudarse a partir del aumento del campo eléctrico, lo que produce un pico de reencendido e inmediatamente se retorna al voltaje de arco nominal cuando se ha alcanzado el potencial de ionización necesario para ionizar las partículas responsables de la conducción de corriente¹².

2. SAW – Submerged Arc Welding:

Descripción del proceso.

De los métodos de soldadura que emplean electrodo continuo, el proceso de arco sumergido desarrollado simultáneamente en EE.UU. y Rusia a mediados de la década del 30, es uno de los más difundidos universalmente¹³.

Es un proceso automático, en el cual, como lo indica la **figura 3**, un alambre desnudo es alimentado hacia la pieza. Este proceso se caracteriza porque el arco se mantiene sumergido en una masa de fundente, provisto desde una tolva, que se desplaza delante del electrodo. El manto de fundente granular cubre por completo la operación de

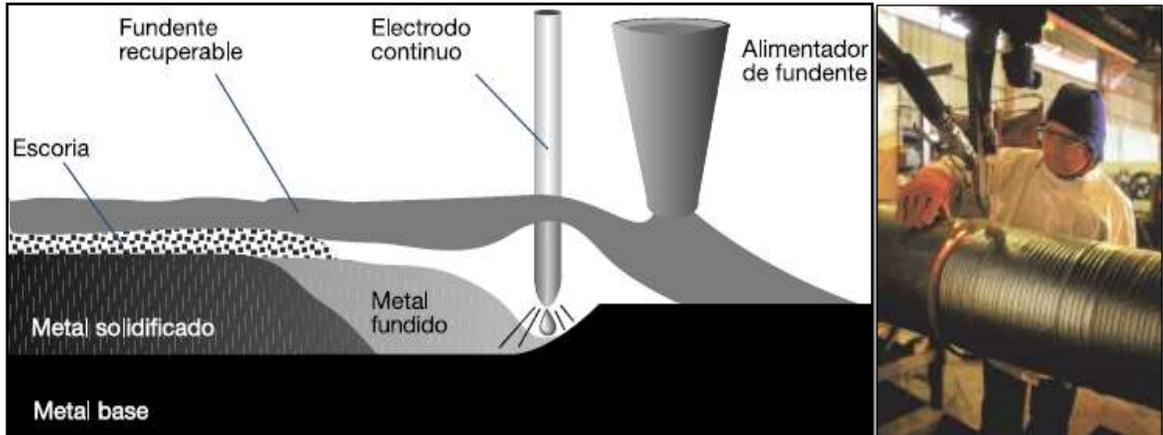
¹¹ Ramirez, J. (2003). *Soldadura por Arco Manual con Electrodo Revestido*. Universidad Central de Venezuela, Escuela de Ingeniería.

¹² Garcia, A. R. (1998). Consideraciones sobre Soldadura Manual con Electrodo Revestido. p 7.

¹³ INDURA S.A, I. y. *Manual de Sistemas y Materiales de Soldadura*. INDURA S.A.

soldadura con arco eléctrico, evitando chispas, salpicaduras y radiaciones que son muy peligrosas en otros procesos de soldadura con arco eléctrico. De esta manera el arco resulta invisible, lo que constituye una ventaja, pues evita el empleo de elementos de protección contra la radiación infrarroja y ultravioleta, que son imprescindibles en otros casos¹⁴.

Figura 3 - Representación esquemática del proceso SAW, a la derecha aplicación en tuberías



Fuente: <http://www.indura.cl>

La parte del fundente más cercano al arco se derrite y se mezcla con el metal de soldadura fundido, que después de solidifican en la parte superior de la unión soldada y forman una escoria con aspecto de vidrio. La escoria y los granos de fundente no derretidos en la parte superior proporcionan una buena protección de la atmosfera y un buen aislamiento térmico para el área de soldadura. Esto produce un enfriamiento relativamente bajo y una unión de soldadura de alta calidad cuyos parámetros de resistencia y ductilidad son notables. El fundente no derretido que queda después de la soldadura puede recuperarse y reutilizarse. La escoria solida que cubre la soldadura debe arrancarse, por lo general por medios manuales¹⁵.

Las corrientes utilizadas en este proceso varían en un rango que va desde los 200 hasta los 2000 amperes, y los espesores que es posible soldar varían entre 5 mm y hasta más de 40 mm. Usualmente se utiliza corriente continua con electrodo positivo, cuando se trata de intensidades inferiores a los 1000 amperes, reservándose el uso de corriente alterna para intensidades mayores, a fin de evitar el fenómeno conocido como sopló magnético. El proceso se caracteriza por sus elevados regímenes de deposición y es normalmente empleado cuando se trata de soldar grandes espesores de acero al carbono o de baja aleación¹⁶.

¹⁴ INDURA S.A, I. y. *Manual de Sistemas y Materiales de Soldadura*. INDURA S.A.

¹⁵ Masabanda, S. J., & Yauripoma, M. R. (2009). *Elaboracion de un manual para Prácticas de la materia Teoría de Procesos de Soldadura*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

¹⁶ INDURA Op. Cit. p. 110.

Ventajas del proceso y aplicaciones.

- Ventajas¹⁷
 - a) Alta velocidad y rendimiento: Con electrodos de 4,0 mm y 4,8 mm a 800 y 1000 amperes, se logran depositar hasta 15 kg de soldadura por hora. Con electrodos de 6,4 mm y 1300 amperes, se depositan hasta 24 kg por hora (tres a cuatro veces más rápido que en la soldadura manual).
 - b) Propiedades de la soldadura: Este proceso permite obtener depósitos de propiedades comparables o superiores a las del metal base.
 - c) Rendimiento: 100%.
 - d) Soldaduras 100% radiográficas.
 - e) Soldaduras homogéneas.
 - f) Soldaduras de buen aspecto y penetración uniforme.
 - g) No se requieren protecciones especiales.

- Aplicaciones

El sistema de soldadura automática por arco sumergido, permite la máxima velocidad de deposición de metal, entre los sistemas utilizados en la industria, para producción de piezas de acero de mediano y alto espesor (desde 5 mm aprox.) que puedan ser posicionadas para soldar en posición plana u horizontal: vigas y perfiles estructurales, estanques, cilindros de gas, bases de máquinas, fabricación de barcos, etc. También puede ser aplicado con grandes ventajas en relleno de ejes, ruedas de FF.CC. y polines¹⁸.

Alambres para arco sumergido.

Descripción.

En el sistema de soldadura por arco sumergido, se utiliza un alambre sólido recubierto por una fina capa de cobrizado para evitar su oxidación y mejorar el contacto eléctrico. El diámetro del hilo utilizado depende fundamentalmente de la intensidad de corriente de soldadura necesaria y puede situarse entre 5 mm de diámetro, para corriente de 150 A, a 10 mm de diámetro para una corriente de 3000 A.

El cordón de soldadura es ligeramente más estrecho con un alambre delgado que con un alambre grueso con la misma intensidad de corriente, pero el efecto principal del tamaño del alambre reside en su penetración¹⁹.

La composición de los alambres para soldadura por arco sumergido depende del material que se suelda, puesto que los elementos aleados se añaden generalmente al alambre y no al fundente. En este proceso las variaciones en la técnica pueden alterar las relaciones de las cantidades fundidas de plancha alambre y fundente.

¹⁷ INDURA S.A, I. y. *Manual de Sistemas y Materiales de Soldadura*. INDURA S.A. p. 111.

¹⁸ IBÍD. p. 111.

¹⁹ Masabanda, S. J., & Yauripoma, M. R. (2009). Op. Cit. p. 78.

Generalmente contiene elementos desoxidantes, que junto a los que aporta el fundente, limpian las impurezas provenientes del metal base o de la atmósfera y aportan elementos de aleación seleccionados según sean las características químicas y mecánicas del cordón de soldadura que se desee²⁰.

Clasificación.

Según la AWS A5.17, los alambres se clasifican por 2 letras y 2 números, que indican la composición química de éstos²¹.

EX **XX**
Letras **dígitos**

E: Significa electrodo para soldadura al arco.

X: Significa el contenido máximo de manganeso:

L: 0,60% Mn máx. (Bajo contenido manganeso).

M: 1,25% Mn máx. (Contenido mediano de manganeso).

H: 2,25% Mn máx. (Alto contenido de manganeso).

XX: Indican los porcentajes medios de carbono.

En la **tabla 1**, se puede observar algunos parámetros recomendados para alambres de soldadura SAW.

Tabla 1 – Parámetros recomendados para alambres de soldadura de arco sumergido SAW.

Diámetro de alambre		Rango de Corriente	Rango de Tensión
Pulgadas	(mm)	Amperios	Voltios
1/16"	1.6	150-500	22-30
5/64"	2.0	175-600	24-32
3/32"	2.4	250-700	26-34
5/32"	4.0	400-1000	28-38

Fuente: <http://www.indura.cl>

Fundentes para arco sumergido.

Descripción.

Los fundentes para la soldadura por arco sumergido están granulados a un tamaño controlado y pueden ser de tipo fundido, aglomerado o sinterizado.

Originalmente se utilizaban fundentes fundidos, machacados y calibrados; atribuyéndoseles las ventajas de estar totalmente libres de humedad y no ser higroscópicos. Tanto la composición química como el estado de división de los

²⁰ Masabanda, S. J., & Yauripoma, M. R. (2009). Op. Cit. p. 78.

²¹ IBÍD. p. 78.

fundentes tienen una importante influencia sobre la forma de comportarse en la soldadura.

Los fundentes aglomerados se hacen mezclando los constituyentes, finamente pulverizados, con una solución acuosa de un aglomerante tal como silicato sódico; la finalidad es producir partículas de unos pocos milímetros de diámetro formados por una masa de partículas más finas de los componentes minerales. Después de la aglomeración el fundente se seca a temperatura de hasta 800°C²².

Los fundentes sinterizados se hacen calentando componentes pulverizados a temperaturas justo por debajo del punto de fusión de algunos de los componentes. Las temperaturas alcanzadas durante la fabricación limitan los componentes de los fundentes. Para fundir un fundente las temperaturas deben ser tan altas que los carbonatos y muchos otros minerales se descomponen, por lo cual los fundentes básicos que llevan carbonatos deben hacerse por alguno de los otros procedimientos, tales como aglomeración.

Tanto la composición de fundente como su estado de división influyen en el control de la porosidad. El proceso de arco sumergido es generalmente más susceptible a la porosidad causada por superficies herrumbrosas y sucias que el proceso de arco abierto. Ello es debido a que con el proceso de arco abierto el vapor de agua y los productos gaseosos, que abandonan la plancha por el calor de la soldadura, pueden escapar; mientras que en el arco sumergido tienden a ser retenidos bajo el cojín de fundente.

Por esta razón es por lo que fundentes que tienen la mayor tolerancia a la oxidación y suciedad son también los que tienen mayor permeabilidad, lograda usando un grano grueso de gran regularidad.

Sin embargo, cuando es necesario soldar utilizando intensidades elevadas se requiere un fundente que cubra más estrechamente, para dar un buen cierre al arco; esto se logra utilizando un tamaño de partículas lo más fino posible y una mayor variedad en tamaños, para aumentar el cierre de recubrimiento²³.

Clasificación de Fundentes según AWS.

Según la AWS el fundente es clasificado en base a las propiedades mecánicas del depósito, al emplear una determinada combinación fundente/alambre.

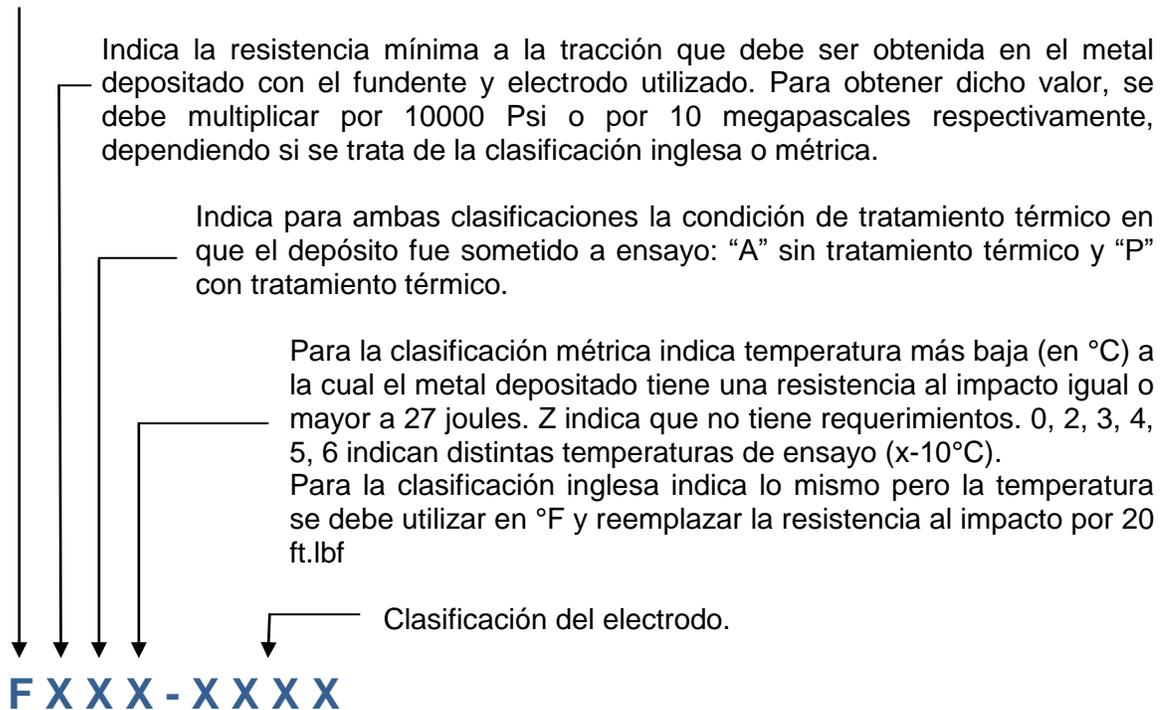
Esta clasificación es la siguiente dependiendo si se utiliza el Sistema Inglés o el Sistema Métrico²⁴:

²² IBÍD. p. 79.

²³ IBÍD. p. 80.

²⁴ INDURA S.A. Op. Cit. p.116.

Indica fundente para ambas clasificaciones.



3. GTAW – Gas Tungsten Arc Welding:

Descripción del proceso.

En nuestros días, las exigencias tecnológicas en cuanto a calidad y confiabilidad de las uniones soldadas, obligan a adoptar nuevos sistemas, destacándose entre ellos la soldadura al Arco con Electrodo de Tungsteno y Protección Gaseosa.

El sistema TIG (Tungsten Inert Gas) es un sistema de soldadura al arco con protección gaseosa, que utiliza el intenso calor de un arco eléctrico generado entre un electrodo de tungsteno no consumible y la pieza a soldar, donde puede o no utilizarse metal de aporte.

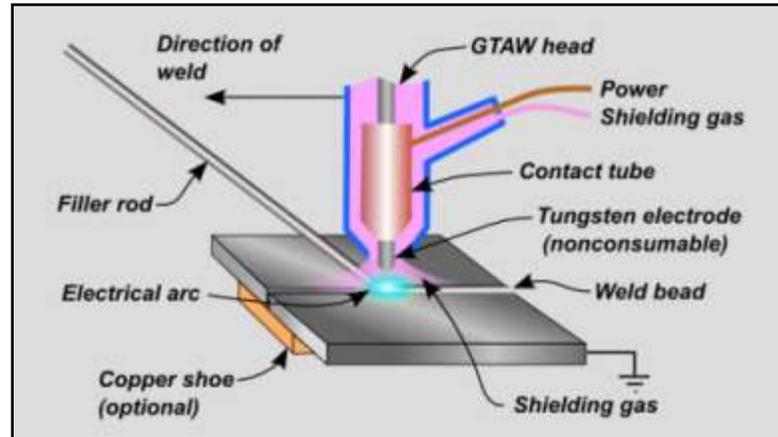
Se utiliza un gas de protección cuyo objetivo es desplazar el aire, para eliminar la posibilidad de contaminación de la soldadura por el oxígeno y nitrógeno presentes en la atmósfera. Como gas protector se puede emplear argón o helio, o una mezcla de ambos. La **figura 4** indica esquemáticamente una soldadura por sistema GTAW (TIG).

La característica más importante que ofrece este sistema es entregar alta calidad de soldadura en todos los metales, incluyendo aquellos difíciles de soldar, como también para soldar metales de espesores delgados y para depositar cordones de raíz en unión de tuberías²⁵.

²⁵ IBÍD. p. 121.

Las soldaduras hechas con sistema TIG son más fuertes, más resistentes a la corrosión y más dúctiles que las realizadas con electrodos convencionales. Cuando se necesita alta calidad y mayores requerimientos de terminación, se hace necesario utilizar el sistema TIG para lograr soldaduras homogéneas, de buena apariencia y con un acabado completamente liso²⁶.

Figura 4 – Esquema del proceso GTAW.



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Soldadura_TIG

Características y ventajas del proceso²⁷.

- No se requiere de fundente, y no hay necesidad de limpieza posterior en la soldadura.
- No hay salpicadura, chispas ni emanaciones, al no circular metal de aporte a través del arco.
- Brinda soldaduras de alta calidad en todas las posiciones, sin distorsión.
- Al igual que todos los sistemas de soldadura con protección gaseosa, el área de soldadura es claramente visible.
- El sistema puede ser automatizado, controlando mecánicamente la pistola y/o el metal de aporte.

Equipo para GTAW²⁸.

El equipo para sistema TIG consta básicamente de:

- Fuente de poder
- Unidad de alta frecuencia
- Pistola
- Suministro gas de protección
- Suministro agua de enfriamiento

²⁶ INDURA S.A, I. y. *Manual de Sistemas y Materiales de Soldadura*. INDURA S.A. p 121.

²⁷ IBÍD. p 121.

²⁸ IBÍD. p 121.

La pistola asegura el electrodo de tungsteno que conduce la corriente, el que está rodeado por una boquilla de cerámica que hace fluir concéntricamente el gas protector. La pistola normalmente se refrigera por aire. Para intensidades de corriente superiores a 200 Amp. se utiliza refrigeración por agua, para evitar el recalentamiento del mango.

Los *gases protectores* son por lo general gases inertes o semi-inertes, su función es crear una protección sobre el metal fundido y así evitar el efecto contaminante de la atmosfera (oxígeno y nitrógeno). Cuanto más denso sea el gas, mejor será su resultado en las aplicaciones de soldadura con arco protegido por gas. El Argón es aproximadamente 10 veces más denso que el Helio, y un 30% más denso que el aire. Cuando el Argón se descarga sobre la soldadura, este forma una nube densa protectora, mientras que la acción del Helio es mucho más liviana y vaporosa, dispersándose rápidamente. Por este motivo, en caso de usar Helio, serán necesarias mayores cantidades de gas (puro o mezclas que contengan Helio) que si se utilizara Argón.

Electrodos para sistema TIG.

Los electrodos para sistema TIG, están fabricados con tungsteno o aleaciones de tungsteno, lo que los hacen prácticamente no consumibles, ya que su punto de fusión es sobre los 3.800° C²⁹.

La **tabla 2** muestra algunas características de identificación para electrodos.

Tabla 2- Electrodos para GTAW

TIPOS DE ELECTRODOS	IDENTIFICACIÓN	AWS
Electrodos de Tungsteno puro	Punto verde	EWP
Electrodos de Tungsteno-Torio (0,8-1,2% Th)	Punto amarillo	EWTh-1
Electrodos de Tungsteno-Torio (1,7-2,2% Th)	Punto rojo	EWTh-2
Electrodos de Tungsteno-Zirconio (0,15-0,4% Zr)	Punto café	EWZr
Electrodos de Tungsteno-Lantano (1,0% La)	Punto negro	EWLa-1
Electrodos de Tungsteno-Lantano (1,5% La)	Punto dorado	EWLa-1,5
Electrodos de Tungsteno-Lantano (2,0% La)	Punto azul	EWLa-2
Electrodos de Tungsteno-Cerio (1,8-2,2% Ce)	Punto naranja	EWCe-2

Fuente: <http://www.indura.cl>

Su identificación se realiza por el color de su extremo:

- Diámetros más utilizados: 1,6 mm; 2,4 mm; 3,2 mm.
- Largos estándar: 76 y 178 mm.
- La adición de 2% de torio permite una mayor capacidad de corriente, mejor iniciación y estabilidad del arco.

²⁹ IBÍD. p 122.

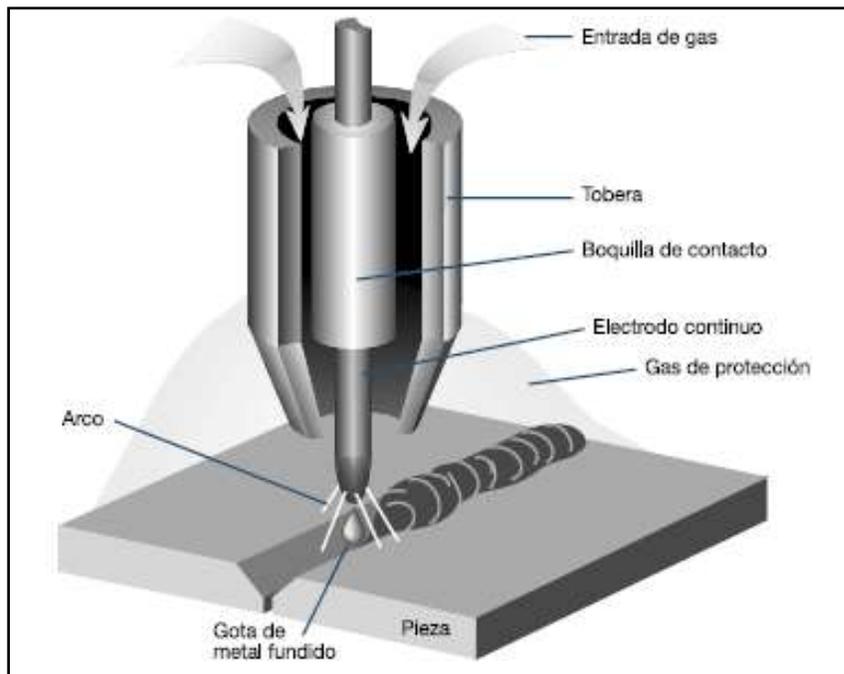
Para obtener buenos resultados en la soldadura debe utilizarse un electrodo afilado correctamente. En general, suelen afilarse en punta, para el soldeo con corriente continua; y en forma semiesférica, para soldar con corriente alterna. También es importante que el electrodo este bien recto, pues en caso contrario, el chorro de gas protector y de arco no fuera concéntrico³⁰.

4. GMAW – Gas Metal Arc Welding:

Descripción del proceso.

El sistema Gas Metal Arc Welding, también conocido como MIG (Metal Inert Gas) fue introducido a fines del año 1940. El proceso es definido por la AWS como un proceso de soldadura al arco, donde la fusión se produce por calentamiento con un arco entre un electrodo de metal de aporte continuo y la pieza, donde la protección del arco se obtiene de un gas suministrado en forma externa, el cual protege el metal líquido de la contaminación atmosférica y ayuda a estabilizar el arco³¹.

Figura 5 - Esquema del proceso GMAW



Fuente: <http://www.indura.cl>

La **figura 5** indica esquemáticamente una soldadura por sistema MIG. El proceso GMAW posee cualidades importantes al soldar aceros, entre las cuales sobresalen:

- El arco siempre es visible para el operador.
- La pistola y los cables de soldadura son ligeros, de fácil manipulación.
- Es uno de los más versátiles entre todos los sistemas de soldadura.

³⁰ Masabanda, S. J., & Yauripoma, M. R. (2009). Op. Cit. p. 65.

³¹ INDURA S.A, I. y. *Manual de Sistemas y Materiales de Soldadura*. INDURA S.A. p. 82.

- d) Rapidez de deposición.
- e) Alto rendimiento.
- f) Posibilidad de automatización.

En el sistema MIG, un sistema de alimentación que impulsa en forma automática y a velocidad predeterminada el alambre-electrodo hacia el trabajo o baño de fusión, mientras la pistola de soldadura se posiciona a un ángulo adecuado y se mantiene una distancia tobera-pieza, generalmente de 10 mm.

Este es un proceso de soldadura por arco eléctrico, en el cual un alambre es automática y continuamente alimentado hacia la zona de soldadura a una velocidad constante y controlada. El área de soldadura y arco están debidamente protegidas por una atmósfera gaseosa suministrada externamente, que evita la contaminación.

El voltaje, amperaje y tipo de gas de protección, determinan la manera en la cual se transfiere el metal desde el alambre-electrodo al baño de soldadura. Para comprender mejor la naturaleza de estas formas de transferencia en el sistema MIG, a continuación se detallan³².

- ***Transferencia metálica.***

En el proceso de soldadura GMAW, las gotas de metal fundido son transferidas a través del arco, desde un alambre-electrodo alimentado continuamente, a la zona de soldadura. Para un diámetro dado de electrodo d , con una protección gaseosa, la cantidad de corriente determina el tamaño de las gotas D y el número de ellas que son separadas desde el electrodo por unidad de tiempo³³, véase la **figura 6**:

Zona A: a valores bajos de amperaje, las gotas crecen a un diámetro que es varias veces el diámetro del electrodo antes que éstas se separen. La velocidad de transferencia a bajos amperajes es sólo de varias gotas por segundo.

Zona B: a valores intermedios de amperaje, el tamaño de las gotas separadas decrece rápidamente a un tamaño que es igual o menor que el diámetro del electrodo, y la velocidad de separación aumenta a varios cientos por segundo.

Zona C: a valores altos de amperaje, la velocidad de separación aumenta a medida que se incrementa la corriente, las gotas son bastante pequeñas.

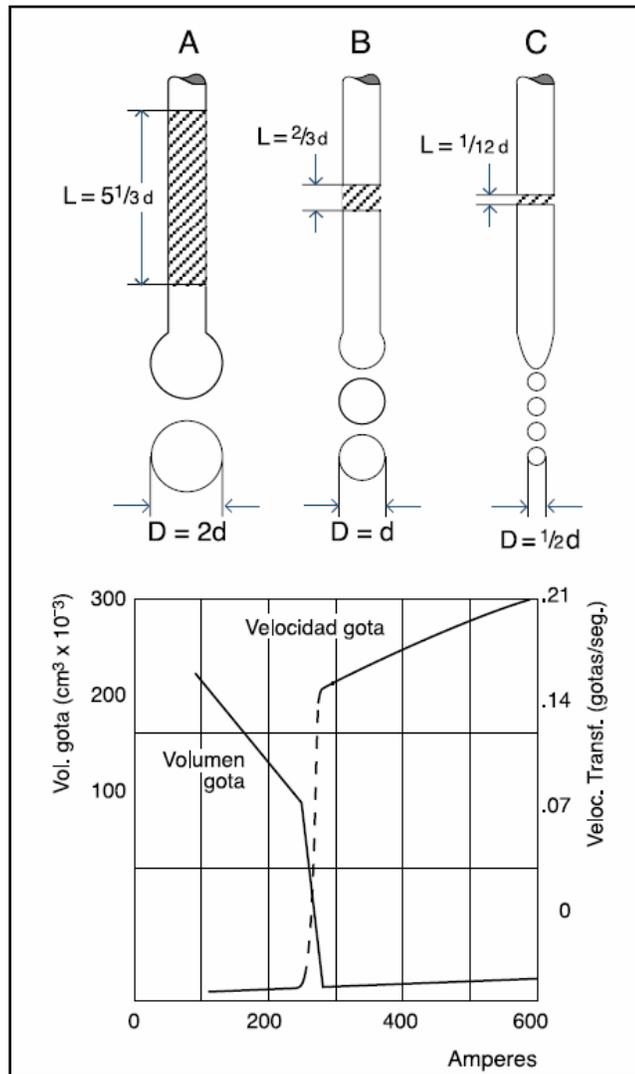
Existen tres formas de transferencia metálica:

1. Transferencia "Spray" o de Rocío.
2. Transferencia "Globular".
3. Transferencia por "Corto-Circuito".

³² IBÍD. p. 83.

³³ IBÍD. p. 84.

Figura 6 – Esquema de los tipos de transferencia metálica en función del amperaje.



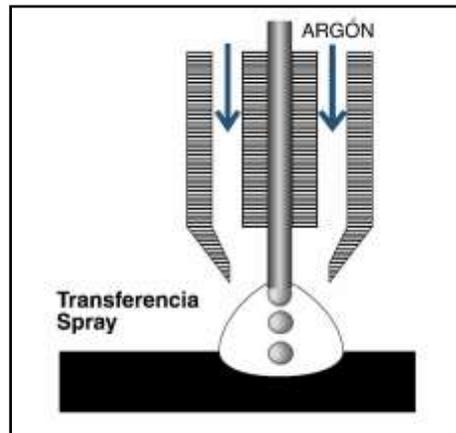
Fuente: <http://www.indura.cl>

- **Transferencia Spray.**

El metal es transportado a alta velocidad en partículas muy finas a través del arco, véase la **figura 7**. La fuerza electromagnética es bastante fuerte para expulsar las gotas desde la punta del electrodo en forma lineal con el eje del electrodo, sin importar la dirección a la cual el electrodo está apuntando. Se tiene transferencia spray al soldar, con argón, acero inoxidable y metales no ferrosos como el aluminio³⁴.

³⁴ IBÍD. p. 84.

Figura 7- Transferencia SPRAY en el proceso GMAW.

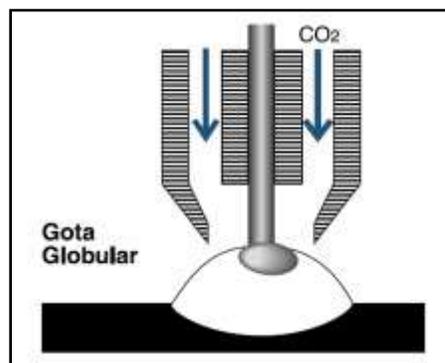


Fuente: <http://www.indura.cl>

- **Transferencia Globular.**

El metal se transfiere en gotas de gran tamaño, véase la **figura 8**. La separación de las gotas ocurre cuando el peso de éstas excede la tensión superficial que tiende a sujetarlas en la punta del electrodo. La fuerza electromagnética que actuaría en una dirección para separar la gota, es pequeña en relación a la fuerza de gravedad en el rango de transferencia globular (sobre 250 Amp). La transferencia globular se utiliza para soldar acero dulce en espesores mayores a 13 mm, en que se requiere gran penetración³⁵.

Figura 8 - Transferencia GLOBULAR en el proceso GMAW.



Fuente: <http://www.indura.cl>

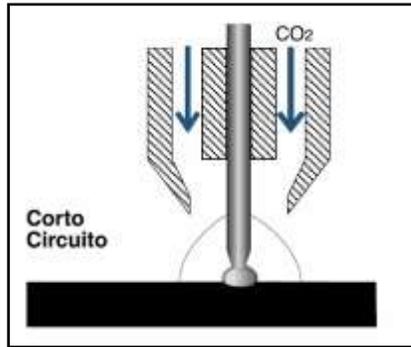
- **Transferencia por Corto Circuito.**

El metal no es transferido libremente a través del arco, sino que se deposita, cuando la punta del electrodo toca el metal base, como se indica en la **figura 9**. Los cortos circuitos producidos por el contacto del electrodo con el baño fundido, ocurren con

³⁵ IBÍD. p. 84.

mucha regularidad, hasta 200 o más veces por segundo. El resultado final es un arco muy estable usando baja energía (inferior a 250 Amp) y bajo calor. El bajo calor reduce al mínimo la distorsión, deformación del metal y otros efectos metalúrgicos perjudiciales. Esta transferencia metálica se obtiene en presencia de dióxido de carbono (CO₂) o mezcla Ar-CO₂³⁶.

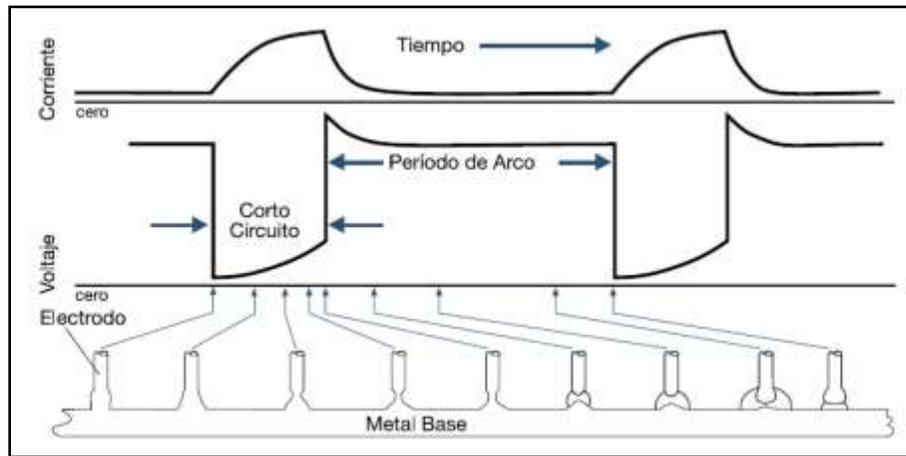
Figura 9 - Transferencia Corto Circuito en el proceso GMAW.



Fuente: <http://www.indura.cl>

La **figura 10** ilustra, por medio de trazos oscilográficos, la secuencia del voltaje y de la corriente durante un ciclo típico de soldadura por corto circuito.

Figura 10 – Comportamiento del voltaje y amperaje durante la transferencia por Corto Circuito.



Fuente: <http://www.indura.cl>

Gases protectores.

El propósito principal del gas de protección es desplazar el aire en la zona de soldadura y así evitar su contaminación por nitrógeno, oxígeno y vapor de agua. Estas impurezas afectan las propiedades del metal de soldadura. La **tabla 3**, permite observar las aplicaciones, características y mezclas más comunes empleadas en el proceso GMAW,

³⁶ IBÍD. p. 85.

en donde se tienen en cuenta varios factores que son necesarios considerar al determinar el tipo de gas de protección a emplear.

Tabla 3 – Mezclas de gases más comunes para el proceso GMAW.

METAL BASE	TRANSFERENCIA SPRAY	TRANSFERENCIA CORTO - CIRCUITO
Acero inoxidable	Argón + 2% CO ₂ Argón + 1% ó 2% O ₂	90% Helio + 7,5% Argón + 2,5% CO ₂
Aceros al carbono y baja aleación	Argón + 2% O ₂ Argón + 20% CO ₂ Argón + 5% CO ₂ Argón + 8% CO ₂	CO ₂ Argón + 20% CO ₂ Argón + 8% CO ₂ Argón + 5% CO ₂
Aluminio y magnesio	Argón o Helio Argón + 25% ó 75% He	
Cobre	Helio Argón + 25%, 50% ó 75% He	

Fuente: <http://www.indura.cl>

Entre otros podemos citar:

1. Tipo de metal base.
2. Características del arco y tipo de transferencia metálica.
3. Velocidad de soldadura.
4. Tendencia a provocar socavaciones.
5. Penetración, ancho y forma del depósito de soldadura.
6. Disponibilidad y costo del gas.
7. Requerimientos de propiedades mecánicas.

En general los gases inertes y activos se emplean en el sistema MIG. Cuando se desea soldar metales no ferrosos, se emplean gases inertes debido a que ellos no reaccionan con los metales. Los gases inertes usados en sistema MIG son: argón, helio y mezclas de argón-helio.

Sin embargo, en la soldadura de metales ferrosos se pueden emplear gases inertes o activos. Gases activos como: Dióxido de carbono, mezclas de dióxido de carbono, o gases protectores que contienen algún porcentaje de oxígeno. Estos gases no son químicamente inertes y pueden formar compuestos con los metales³⁷.

Sistema de clasificación de los electrodos para proceso GMAW.

La AWS clasifica los alambres sólidos, usando una serie de números y letras. Para aceros al carbono, la clasificación está basada en las propiedades mecánicas del depósito de soldadura y su composición química³⁸.

³⁷ IBÍD. p. 85.

³⁸ IBÍD. p. 87.

Una típica clasificación de electrodo MIG para soldadura de acero es:

ER-70S-6 (Sistema inglés) ó ER-48S-6 (Sistema métrico)

1. La letra E indica electrodo
2. La letra R indica varilla
3. Los dos (o tres) dígitos siguientes indican la resistencia a la tracción en miles de libras/pulg² o decenas de megapascales según se use el sistema de unidades inglés o métrico respectivamente.
4. La letra S indica que el tipo de alambre es sólido.
5. El dígito, o letra y dígito indica la composición química especial del electrodo.

Así, ER-70S-6 indica un electrodo-varilla, sólido, con una resistencia mínima a la tracción de 70.000 lb/pulg² y ER-48S-6 un electrodo-varilla, sólido, con una resistencia mínima a la tracción de 480 MPa.

5. FCAW – Flux Cored Arc Welding:

Descripción del proceso.

La soldadura al arco con núcleo de fundente (FCAW), conocido como MIG tubular, es un proceso de soldadura que aprovecha el arco eléctrico entre un electrodo continuo de metal de aporte y el metal base. Este proceso emplea un fundente que va al interior del alambre conocido como tubular, sin embargo de igual forma puede ir con o sin ayuda de una protección externa gaseosa. El aspecto que distingue al proceso tubular (FCAW) de otros procesos de soldadura por arco es la incorporación de componentes en el fundente dentro de un electrodo de alimentación continua. Las notables características de operación del proceso y las propiedades de la soldadura resultante se pueden atribuir al empleo de este tipo de electrodo³⁹.

El FCAW tiene dos variaciones principales que difieren en su método de protección del arco y de la poza de soldadura contra la contaminación por gases atmosféricos (oxígeno y nitrógeno). Una de ellas, es el *tubular autoprotegido (figura 11)* que resguarda al baño mediante la descomposición y vaporización del núcleo fundente en el calor del arco. El otro tipo, es el *tubular con protección externa gaseosa (figura 12)*, este utiliza un flujo de gas que protege la zona de trabajo. En ambos métodos, el material del núcleo del electrodo proporciona una capa de escoria abundante que protege el metal de soldadura durante su solidificación⁴⁰.

Las aplicaciones de las dos variantes del proceso FCAW se traslapan, pero las características específicas de cada una las hacen apropiadas para diferentes condiciones de operación.

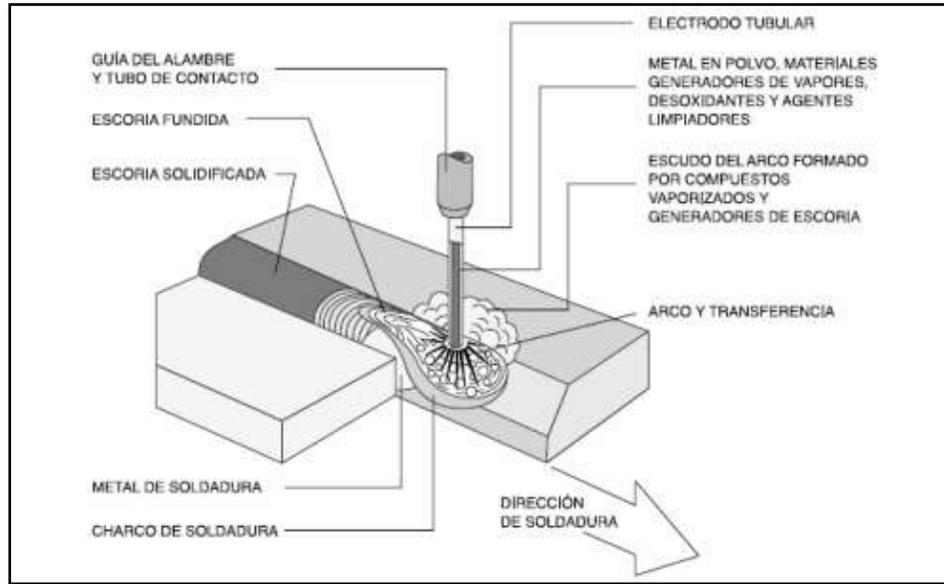
El tipo de FCAW que se use, dependerá del tipo de electrodos de que se dispone, los requisitos de propiedades mecánicas de las uniones soldadas y los diseños y

³⁹ INDURA S.A, I. y. *Manual de Sistemas y Materiales de Soldadura*. INDURA S.A. p 98.

⁴⁰ IBÍD. p. 98.

emplantillado de las uniones. En general, el método autoprotegido puede usarse en aplicaciones que normalmente se unen mediante soldadura por arco manual.

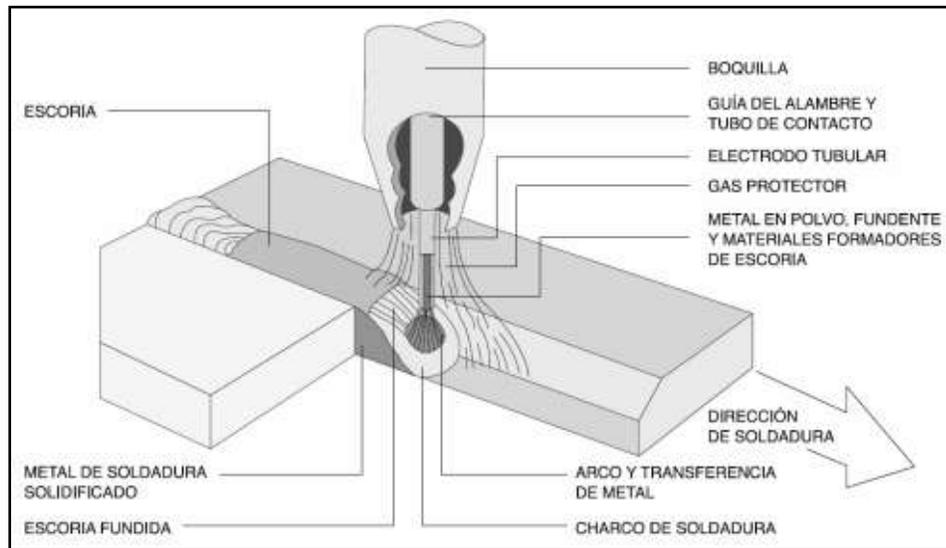
Figura 11 - Esquema del proceso FCAW autoprotegido.



Fuente: <http://www.indura.cl>

El método con protección gaseosa puede servir para algunas aplicaciones que se unen con el proceso de soldadura GMAW/GTAW. Es preciso comparar las ventajas del proceso FCAW con las de esos otros procesos cuando se evalúa para una aplicación específica⁴¹.

Figura 12 - Esquema del proceso FCAW con protección externa gaseosa.



Fuente: <http://www.indura.cl>

⁴¹ IBÍD. p. 99.

El proceso tubular tiene amplia aplicación en trabajos de fabricación en taller, mantenimiento y construcción en terreno. Se ha usado para soldar ensambles que se ajustan al código de calderas y recipientes de presión de la ASME, a las reglas del American Bureau of Shipping (ABS) y a ANSI/AWS D1.1, código de soldadura acero estructural. El FCAW tiene categoría de proceso precalificado en ANSI/AWS D1.1.

Se han usado electrodos de acero inoxidable con núcleo fundente, autoprotegidos y con protección gaseosa, para trabajos de fabricación en general, recubrimiento, unión de metales disímiles, mantenimiento y reparación⁴².

Equipo para FCAW.

El equipo básico para la soldadura por alambre tubular autoprotegido y con protección gaseosa es similar al usado en el proceso GMAW, la principal diferencia radica en el suministro y regulación del gas para el arco en la variante con protección gaseosa. La fuente de poder recomendada es la de corriente continua y voltaje constante, similar a la que se usa para soldadura por sistema MIG/MAG. Esta fuente deberá ser capaz de trabajar en el nivel de corriente máximo requerido para la aplicación específica.

El propósito del control de alimentación del alambre es suministrar el electrodo continuo al arco de soldadura con una velocidad constante previamente establecida. La rapidez de alimentación del electrodo determina el amperaje de soldadura suministrado por una fuente de poder de voltaje constante. Si se modifica esta rapidez, la máquina soldadora se ajustará automáticamente para mantener el voltaje de arco pre-establecido. La velocidad de alimentación del electrodo se puede controlar por medios mecánicos o electrónicos.

Este proceso requiere rodillos impulsores o alimentadores que no deformen el electrodo tubular. Se emplean diversos rodillos con superficies ranuradas y moleteadas. Algunos alimentadores de alambre tienen sólo un par de rodillos impulsores, mientras que otros cuentan con dos pares, en los que por lo menos uno de los rodillos de cada par está conectado a un motor⁴³.

Características principales.

El proceso FCAW combina características de la soldadura por arco manual protegido SMAW, soldadura GMAW y la soldadura por arco sumergido SAW, de esta combinación se obtienen los siguientes beneficios:

1. La productividad de la soldadura de alambre continuo.
2. Las cualidades metalúrgicas que pueden derivarse de un fundente.
3. Una escoria que sustenta y moldea el cordón de soldadura.

En el método con protección gaseosa externa, generalmente se utiliza una mezcla de argón y dióxido de carbono, también se utiliza 100% dióxido de carbono.

⁴² IBÍD. p. 99.

⁴³ IBÍD. p. 100.

Por su parte, en el proceso tubular autoprotegido, la protección se obtiene a partir de ingredientes del fundente que se vaporizan y que desplazan el aire y además por la escoria que cubre las gotas de metal fundido y la poza de soldadura durante la operación.

Con ciertos tipos de electrodos autoprotegidos, la polaridad recomendable es la corriente continua electrodo negativo (CCEN), ya que produce menor penetración en el metal base⁴⁴.

Sistema de clasificación del alambre para proceso FCAW⁴⁵.

La AWS clasifica los alambres tubulares, usando una serie de números y letras, esta clasificación se basa en las propiedades mecánicas del depósito de soldadura:

- **E71T-1C o E71T-1M (Sistema inglés)**
- **E491T-1C o E491T- 1M (Sistema métrico)**

1. La letra E indica electrodo.
2. El primer dígito (para el sistema inglés) o los dos primeros (para el sistema métrico), indican la resistencia mínima a la tracción del metal depositado al multiplicarlos por 10.000 psi o por 10 MPa dependiendo si se trata del sistema inglés o métrico respectivamente.
3. El dígito que precede a la letra "T" indica la posición de soldadura. Puede ser un "0" o un "1". El "0" indica adecuado para posición plana y horizontal, el "1" para toda posición.
4. La letra "T" indica que se trata de un alambre tubular con núcleo fundente.
5. El dígito ubicado después del guión, indica el uso adecuado del electrodo, en cuanto a polaridad y características generales de operación. Este puede ser un número de 1 a 14, o la letra "G" o "GS". La letra G indica que la polaridad y las características generales de operación no se especifican. La letra "S" ubicada después de la "G" indica que el electrodo es sólo adecuado para una pasada.
6. La letra final, indica el gas de protección requerido para alcanzar dicha clasificación del electrodo. La letra "C" indica 100% CO₂ y "M" mezcla 75-85% argón / balance CO₂. La ausencia de dichas letras, indica que se trata de un alambre tubular autoprotegido, el cual mediante la descomposición de su fundente protege al baño de soldadura.

6. PAW – Plasma Arc Welding.

La soldadura por arco plasma utiliza los mismos principios que la soldadura TIG, por lo que puede considerarse como un desarrollo de este último proceso, véase la **figura 13**. Sin embargo, tanto la densidad energética como las temperaturas son en este proceso mucho más elevadas ya que el estado plasmático se alcanza cuando un gas es

⁴⁴ IBÍD. p. 99.

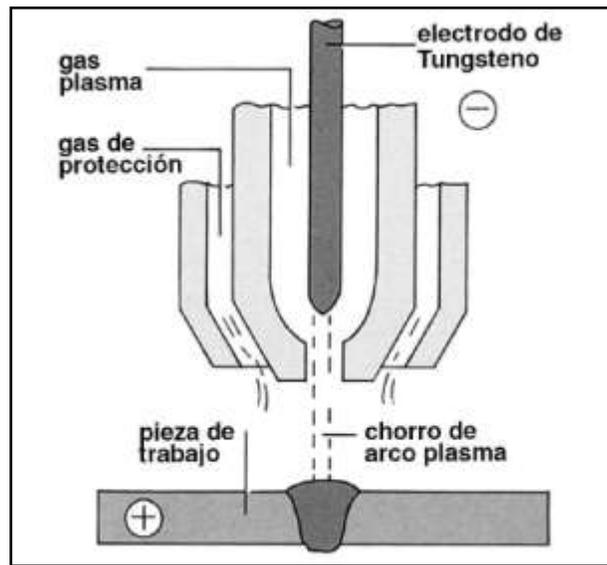
⁴⁵ IBÍD. p. 100.

calentado a una temperatura suficiente para conseguir su ionización, separando así el elemento en iones y electrones⁴⁶.

El arco empleado en el proceso TIG se puede convertir en un arco de alta energía si se le obliga a pasar por un pequeño orificio practicado en la boquilla, este se constriñe y forma el chorro de plasma.

La mayor ventaja del proceso PAW es que su zona de impacto es dos o tres veces inferior en comparación a la soldadura TIG, por lo que se convierte en una técnica óptima para soldar metal de espesores pequeños.

Figura 13 – Esquema de trabajo en el proceso PAW.



Fuente: Manual de conceptos básicos en soldadura y corte⁴⁷.

En la soldadura por plasma la energía necesaria para conseguir la ionización la proporciona el arco eléctrico que se establece entre un electrodo de tungsteno y el metal base a soldar. Como soporte del arco se emplea un gas, generalmente argón puro o en ciertos casos helio con pequeñas proporciones de hidrógeno, que pasa a estado plasmático a través del orificio de la boquilla que estrangula el arco, dirigiéndose al metal base un chorro concentrado que puede alcanzar los 28.000 °C. El flujo de gas de plasma no suele ser suficiente para proteger de la atmósfera al arco, el baño de fusión y al material expuesto al calentamiento. Por ello a través de la envoltura de la pistola se aporta un segundo gas de protección, que envuelve al conjunto.

Características principales del proceso.

La soldadura por arco Plasma se basa en tres técnicas principales: ojo de cerradura o keyhole, microplasma y plasma. En el primer caso, el arco de plasma crea un agujero a

⁴⁶ Air Products - INFRA. *Manual de conceptos basicos en soldadura y corte. SOLDADOR, soldadura y oxicorte con gas de proteccion.*

⁴⁷ IBÍD. p 21.

través de la unión. A medida que la antorcha se desplaza a lo largo de la unión, el metal se funde en el frente del agujero de vapor, se desplaza girando hacia la parte de atrás y solidifica formando el cordón de soldadura.

La soldadura microplasma permite la aplicación de soldadura de materiales de calibres muy delgados (más delgados del calibre 16, y permite soldaduras en espesores que no permitirían soldarse con ningún otro proceso). En la **tabla 4**, se observan las recomendaciones de aplicaciones de gases en el proceso PAW.

Tabla 4 – Recomendaciones generales para aplicaciones de gases en PAW.

PROCESO	ESPESOR (mm)	RANGO DE CORRIENTE (A)
Microplasma	0,05 – 0,5	0,5 – 25
Plasma	0,5 – 3,0	10 – 250
Key – hole	3,0 - 10	Mayor a 250
MATERIAL	GAS PLASMA	GAS DE PROTECCIÓN
Aceros al carbono y aceros aleados	Argón Alta Pureza	Mezcla Argón – Hidrogeno
Aceros inoxidable austeníticos	Argón Alta Pureza	Mezcla Argón – Hidrogeno
Níquel, cobre y aleaciones	Argón Alta Pureza	Mezcla Argón – Helio
Metales preciosos (oro, plata, platino, cobre, titanio, zirconio).	Argón Alta Pureza	Mezcla Argón - Helio

Fuente: Manual de conceptos básicos en soldadura y corte INFRA.

El proceso de soldadura por arco Plasma se emplea principalmente para uniones a tope de placas y tuberías (de bajo y mediano espesor). Su ventaja principal es que permite una penetración controlada⁴⁸.

Los electrodos de tungsteno son los mismos que se utilizan en TIG con corriente directa. Este proceso aunque no se de gran aplicabilidad en la industria de fabricación de oleoductos y gasoductos, es citado y avalado por el estándar API 1104⁴⁹.

7. OFW – Oxi Fuel Welding.

Al igual que el proceso PAW este proceso de oxigás está permitido por el estándar API 1104 durante la fabricación de oleoductos o gasoductos⁵⁰.

El proceso de oxigás posee las siguientes ventajas: el equipo es portátil, económico y puede ser utilizado en toda posición. El proceso oxigás es normalmente usado para soldar metales de hasta 6,4 mm de espesor. Se puede utilizar también para soldar metales de mayor espesor, pero ello no es recomendable⁵¹.

⁴⁸ Air Products - INFRA. *Manual de conceptos basicos en soldadura y corte. SOLDADOR, soldadura y oxicorte con gas de proteccion.* p 21.

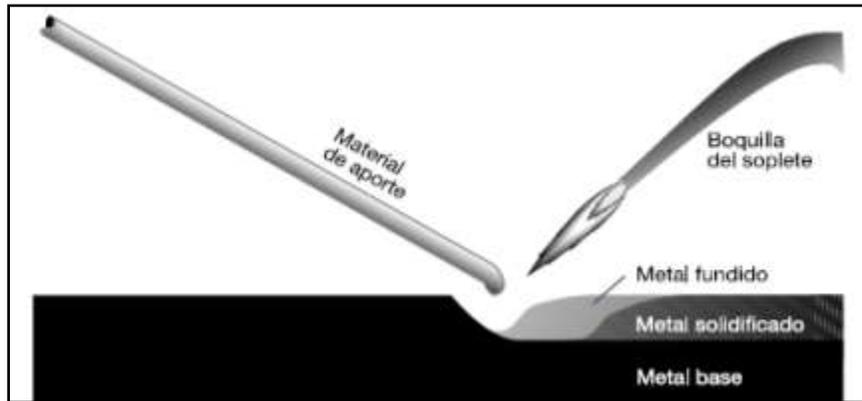
⁴⁹ Autor (según revisión del estándar API 1104).

⁵⁰ IBÍD.

⁵¹ INDURA S.A. Op. Cit. p.129.

Su mayor aplicación en la industria se encuentra en el campo del mantenimiento, reparación, soldadura de tuberías de diámetro pequeño y manufacturas livianas. También puede ser usado como fuente de energía calórica, para calentar, doblar, forjar, endurecer, etc.

Figura 14 – Esquema del Proceso de Oxigás.



Fuente: <http://www.indura.cl>

6.2 MARCO CONCEPTUAL

- ✓ **API 5L:** especificación de tubería en acero soldada y sin costura para ser usada en sistemas de tubería de transporte en la industria de petróleo y gas natural, la tubería es fabricada de acuerdo a dos niveles de producto PSL 1 y PSL 2 en la sección 6⁵², véase la **tabla 5** para observar las composiciones de tubería.
- ✓ **Oleoducto:** sistema de tubería de transporte de líquidos derivados del petróleo tales como crudo, gasolina natural, líquidos de gas natural, GLP (gas licuado de petróleo), alcoholes líquidos y condensados, entre otros⁵³.
- ✓ **Gasoducto:** son todas las partes de las instalaciones físicas a través de las cuales se mueve el gas en su transporte, incluyendo tuberías, válvulas, accesorios, bridas (incluyendo el empernado y las empaquetaduras), reguladores, recipiente a presión, amortiguadores de pulsación, válvulas de desfogue, y otros accesorios instalados en la tubería, unidades de compresión, estaciones de medición, estaciones de regulación, y conjuntos fabricados (sección 803.18⁵⁴).

Se incluyen en esta definición las líneas de transporte y recolección de gas, incluyendo sus complementos o accesorios que se halla instalados costa fuera para el transporte de gas desde las instalaciones de producción a localidades en tierra y equipos de almacenamientos de gas del tipo de tubería cerrada, que se fabrican o se forjan de tubería o se fabrican con tubería y accesorios.

⁵²API, A. P. (2008). *Specification 5L - Petroleum and natural gas industries - Steel pipe for pipeline transportation systems*.

⁵³ASME, A. S. (2006). *Pipeline transportation Systems for Liquid hydrocarbons and other liquids*.

⁵⁴ASME, A. S. (2003). *Gas transmission and distribution piping systems*.

Tabla 5 – Composición química en cada uno de los niveles y grados de tubería API 5L.

PSL 1					
Grades	Carbon maxi (a)	Manganese maxi (a)	Phosphorus maxi	Sulfur maxi	Other
<i>seamless</i>					
A	0.22	0.90	0.030	0.030	
B	0.28	1.20	0.030	0.030	b, d
X42	0.28	1.30	0.030	0.030	c, d
X46, X52, X56	0.28	1.40	0.030	0.030	c, d
X60(e), X65(e)	0.28	1.40	0.030	0.030	c, d
X70(e)					
<i>welded</i>					
A	0.22	0.90	0.030	0.030	
B	0.26	1.20	0.030	0.030	b, d
X42	0.26	1.30	0.030	0.030	c, d
X46, X52, X56	0.26	1.40	0.030	0.030	c, d
X60(e)	0.26	1.40	0.030	0.030	c, d
X65(e)	0.26	1.45	0.030	0.030	c, d
X70(e)	0.26	1.65	0.030	0.030	c, d
PSL 2					
Grades	Carbon maxi (a)	Manganese maxi (a)	Phosphorus maxi	Sulfur maxi	Other
<i>seamless</i>					
B	0.24	1.20	0.025	0.015	b, d
X42	0.24	1.30	0.025	0.015	c, d
X46, X52, X56	0.24	1.40	0.025	0.015	c, d
X60(e), X65(e), X70(e), X80(e)	0.24	1.40	0.025	0.015	c, d
<i>welded</i>					
B	0.22	1.20	0.025	0.015	b, d
X42	0.22	1.30	0.025	0.015	c, d
X46, X52, X56	0.22	1.40	0.025	0.015	c, d
X60(e)	0.22	1.40	0.025	0.015	c, d
X65(e)	0.22	1.45	0.025	0.015	c, d
X70(e)	0.22	1.65	0.025	0.015	c, d
X80(e)	0.22	1.85	0.025	0.015	c, d

- ✓ **Hidrocarburos:** son compuestos orgánicos formados únicamente por "átomos de carbono e hidrógeno". La estructura molecular consiste en un armazón de átomos de carbono a los que se unen los átomos de hidrógeno. Los hidrocarburos son los compuestos básicos de la Química Orgánica, estos forman cadenas de átomos de carbono pueden ser lineales o ramificadas y abiertas o cerradas.
Los hidrocarburos extraídos directamente de formaciones geológicas en estado líquido se conocen comúnmente con el nombre de petróleo, mientras que los que se encuentran en estado gaseoso se les conoce como gas natural. Del petróleo se derivan muchos productos como el aceite crudo, la gasolina natural, líquidos del gas natural, gas licuado de petróleo y otros productos del petróleo⁵⁵.
- ✓ **Gas:** es cualquier mezcla de gas o gas apropiado para unos como combustible domestico o industrial. Los tipos comunes son el gas natural, gas manufacturado y gas licuado de petróleo, distribuido como un vapor, con mezcla de aire o sin ella⁵⁶.

⁵⁵ API, A. P. (2008). Op. Cit. sección 400.2.

⁵⁶ ASME, A. S. (2006). Op. Cit. sección 803.11.

7. MARCO METODOLÓGICO

7.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Para el desarrollo de la monografía “*Estado del Arte de los Procesos de Soldadura involucrados en el montaje de tubería API 5 L para transporte de hidrocarburos*” se maneja el tipo de investigación descriptiva de manera que se logro recopilar, evaluar y clasificar de manera práctica, sencilla y entendible los diferentes criterios y procesos aplicables en la construcción de oleoductos y gasoductos.

La propuesta metodológica busca identificar aquellos documentos, artículos, y/o ensayos en donde por sus aportes podamos conocer el estado actual de los procesos de soldadura aplicables en la construcción de los sistemas descritos, de esta manera el enfoque es de tipo cualitativo, mediante el cual se analizan y evalúan la bibliografía encontrada y citada mostrando solamente las que potencialmente se encuentren en el alcance del estudio, limitando la búsqueda en materiales y aplicaciones específicas.

7.2 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

Las actividades que se deben efectuar, para cumplir cada uno de los objetivos específicos propuestos se muestra de manera estructurada (WBS) como sigue:

a. REVISIÓN DE LA NECESIDAD

- ✓ Recolección de la información, de forma sistemática y de acuerdo a las necesidades de la revisión del estado del arte.
- ✓ Revisión de la bibliografía existente.
- ✓ Consultas a expertos y direccionamiento en la búsqueda de la información.

b. ESTUDIO DE LA INFORMACIÓN

- ✓ Estudio, clasificación y selección de los documentos encontrados.
- ✓ Análisis técnico de cada documento donde se evidencia la aplicación de acuerdo a lo requerido en los objetivos de la monografía.

c. CONCLUSIONES

- ✓ Conclusiones y recomendaciones de acuerdo a lo encontrado en la revisión bibliográfica, comparado con lo aplicable y viable en la construcción y fabricación de sistemas de transporte de hidrocarburos.

7.3 MARCO LEGAL Y NORMATIVO

En la tabla 6 se observan las normas, estándares y códigos *internacionales* que aplican durante el diseño, construcción y montaje de sistemas de transporte de hidrocarburos en Colombia.

Tabla 6 - Códigos, estándares y normas Internacionales en Oleoductos y Gasoductos aplicables en Colombia.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API)	
STANDARD	DESCRIPCIÓN
STD 591	Process Valve Qualification Procedures
STD 594	Check Valves: Flanged, Lug, Wafer and Butt – Welding
STD 598	Valve Inspections and Testing
STD 602	Compact Carbon Steel Gate Valves
STD 603	Corrosion-Resistant, Bolted Bonnet Gate Valves – Flanged and Butt - Welding Ends
STD 607	Fire Test for Soft Seated Quarter – Turn Valves
STD 608	Metal Ball Valves – Flanged and Butt – Welding Ends
STD 610	Centrifugal Pumps for Petroleum, Heavy Duty Chemical Gas Industry Services and Gas Industries Services
STD 682	Pumps shaft sealing system for Centrifugal and Rotary Pumps
STD 676	Positive Displacement rotary pumps
STD 1164	Pipeline SCADA Security
STD 2530	Orifice Metering of Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Fuels
5L	Specification for Line Pipe
6D	Specification for Pipeline Valves
6FA	Specification for Fire Test for Valves
RP 541	Form-Wound Squirrel Cage Induction Motors – 250 Horsepower and Larger
RP 1102	Steel Pipelines Crossing Railroads and Highways.
RP 1104	Welding of Pipelines and Related Facilities
AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME)	
STANDARD	DESCRIPCIÓN
Section II	Materials specifications.
Section V	Non–Destructive Examination
Section VIII	Boiler and Pressure Vessel Code - Section. VIII, Div. 1 Rules for Construction of Un-fired Pressure Vessels
Section IX	Qualification Standard For Welding, And Brazing Procedures, Welders, Brazers, And Welding And Brazing Operators
B73.1	Centrifugal Horizontal Pumps
B1.20.1	Pipe Threads, General Purpose (inch)
B16.1	Cast Iron Pipe Flanges and Flanged Fittings
B16.5	Pipe Flanges and Flanged Fittings
B16.9	Factory-Made Wrought Butt welding Fittings
B16.10	Face to Face and End to End Dimensions of Valves
B16.11	Forged Fittings, Socket Welding and Threaded
B16.25	Butt – Welding Ends
B18.2.1	Square and Hex Bolts and Screws, Inch Series
B18.2.2	Square and Hex Nuts
B16.20	Metallic Gaskets for Pipe Flanges: Ring-Joint, Spiral-Wound, and Jacketed
B16.21	Nonmetallic Flat Gaskets for Pipe Flanges
B16.34	Valves – Flanged, Threaded and Welding End
B16.47	Large Diameter Steel Flange: NPS 26 through NPS 60
B31.4 - 2009	Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids
NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION (NFPA)	
STANDARD	DESCRIPCIÓN
NFPA 1	Uniform Fire Code
NFPA 13	Standard for the Installations of Sprinkler Systems

NFPA 14	Standard for the Installation of Standpipe, Private Hydrant, and Hose Systems
NFPA 15	Standard for Water Spray Fixed Systems for Fire Protection
NFPA 20	Standard for the Installation of Stationary Pumps for Fire Protection
NFPA 22	Standard for Water Tanks for Private Fire Protection
NFPA 24	Standard for the Installation of Private Fire Service Mains and Their Appurtenances.
NFPA 30	Flammable and Combustible Liquids Code.
NFPA 70	National Electrical Code
NFPA 72	National Fire Alarm Code
NFPA 77	Recommended Practice on Static Electricity
NFPA 101	Life Safety Code
NFPA 170	Standard for Fire Safety and Emergency Symbols
STEEL STRUCTURES PAINTING COUNCIL (SSPC)	
STANDARD	DESCRIPCIÓN
SSPC-PA-1	Paint Application Specification
SSPC-PA-2	Measurement of Dry Paint Thickness with Magnetic Gauges
SSPC-PA-3	A Guide to Safety in Paint Applications
SSPC SP1	Solvent Cleaning
SSPC SP2	Hand Tool Cleaning
SSPC SP3	Power Tool Cleaning
SSPC SP5	White Metal Blast Cleaning
SSPC SP6	Commercial Blast Cleaning
SSPC SP7	Brush-Off Blast Cleaning
SSPC SP10	Near White Blast Cleaning
SSPC-SP11	Power Tool Cleaning to Bare Metal
NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS (NACE)	
STANDARD	DESCRIPCIÓN
RP 0188	Discontinuity (Holiday) Testing of New Protective Coatings on Conductive Substrates
RP 0274 - 2004	High-Voltage Electrical Inspection of Pipeline Coatings
RP 0490 - 2001	Holiday Detection of Fusion-Bonded Epoxy External Pipeline Coatings of 250 to 760 um
AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS)	
STANDARD	DESCRIPCIÓN
AWS D1.1	Structural Welding Code
AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM)	
STANDARD	DESCRIPCIÓN
ASTM D-4541	Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers
ASTM G14	Standard Test Method for Impact Resistance of Pipeline Coatings (Falling Weight Test)
ASTM E 125	Standard Reference Photographs for Magnetic Particle Indications on Ferrous Castings
ASTM E 709	Standard Guides for Magnetic Particle Testing
AMERICAN INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES (AISC)	
STANDARD	DESCRIPCIÓN
AISC 325-05	Steel Construction Manual, 13th Edition (5th Printing)
AISC 2005	Seismic Provisions for Structural Steel Buildings
AISC 303-10	Code of Standard Practice for Structural Steel Buildings and Bridges
AISC 327-05	Seismic Design Manual

Fuente: El autor.

En la tabla 7 se observan las normas, estándares y códigos *nacionales* que aplican durante el diseño, construcción y montaje de sistemas de transporte de hidrocarburos en Colombia.

Tabla 7– Códigos, estándares y normas Nacionales aplicables en Oleoductos y Gasoductos Colombia.

CÓDIGOS Y ESTÁNDARES COLOMBIANOS	
NTC-2050	Código Eléctrico Colombiano (Icontec)
RETIE	Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (Ministerio de minas y energía).
RETILAP	Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público (Ministerio de minas y energía).
NSR-10	Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente
CCDSP-95	Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes
INVIAS	Normas para construcción y ensayos de materiales para carreteras
RAS 2000	Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico
NIO-ECOPETROL	Normas de ingeniería de oleoducto
Ministerio de Minas (Decreto-283-1990)	Reglamentación para el almacenamiento, manejo, transporte, distribución de combustibles líquidos derivados del petróleo.

Fuente: El autor.

8. ANÁLISIS Y RESULTADOS

8.1 DESARROLLO DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA.

La propuesta metodológica para el desarrollo del *Estado del arte de los procesos de soldadura involucrados en el montaje de tubería API 5L para transporte de hidrocarburos*, se encuentra fundamentada en la recolección y búsqueda bibliográfica de documentos, tesis, artículos y otros que estén relacionados con el tema. Los resultados del trabajo de investigación y revisión bibliográfica fueron obtenidos mediante el desarrollo de las tres etapas del método de investigación (ítem 7.2) de acuerdo al cumplimiento de los objetivos planteados inicialmente.

La extensa revisión bibliográfica (alrededor de 54 documentos) resulto ser una búsqueda cuidadosa con el objetivo de no desviarse en el alcance del estado del arte, de esta forma al terminar la revisión se obtuvo una selección apropiada para el análisis y resultado de la monografía, para este fin se escogieron 10 documentos que a consideración del autor son los más representativos y muestran el estado del arte actual en los procesos de soldadura para sistemas de transporte de hidrocarburos.

8.2 ESTUDIO DE LA INFORMACIÓN

Cabe destacar que en el estado del arte, se espera ampliar y contextualizar la construcción de oleoductos y los procesos de soldadura en Colombia, sin embargo la bibliografía encontrada para el desarrollo del estado del arte se reduce a casos en Europa y algo en Ecuador (este último desarrollado por empresas españolas)⁵⁷.

La documentación colombiana al respecto, se limita a artículos, tesis en Ingeniería, Ciencias Sociales y Humanas, Gestión Ambiental, tales como:

1. *“La industria Petrolera en el Huila en la década del 90”* Autor, Henry Rubiano Daza, presentado para optar por el título de Magister de Historia. Universidad Nacional de Colombia, 2010.
2. *“Áreas de alta consecuencia en la gestión de integridad de oleoductos en Colombia”* Autores, Omar Javier Daza, Enrique Vera López, Rigaud Sanabria, presentado en la Revista *Facultad de Ingeniería UPTC*, 2010, paginas 69 – 80.
3. *“Petróleo y deuda Ecológica, INICIOS DE LA HISTORIA DE UN SAQUEO”* Autor, Tatiana Roa Avendaño, artículo Censat Agua VIVA – FoE (Colombia), 2002.
4. *“Exploración de Petróleo en Colombia: una aproximación empírica”*. Autor, Paulo Cesar Aguirre Gálvez, presentado en el documento CEDE 2003-19/ ISSN 1657 / 7191, Universidad de los Andes, Agosto 2003.
5. *“Petróleo, seguridad ambiental y exploración petrolera marina en Colombia”* Autor: Alfonso Avellaneda Cusaria (Universidad El Bosque), presentado en la Revista de Ciencias Sociales, Num. 21, Quito, ISSN: 1390 – 1249, Enero 2005 paginas 11-17

⁵⁷ Fernández de la Guerrero, Ramón (1970). Una gran obra de la ingeniería Española: El Oleoducto Duran- Quito (Ecuador) para la empresa de Ferrocarriles del Estado. *Revista de Obras Publicas*.

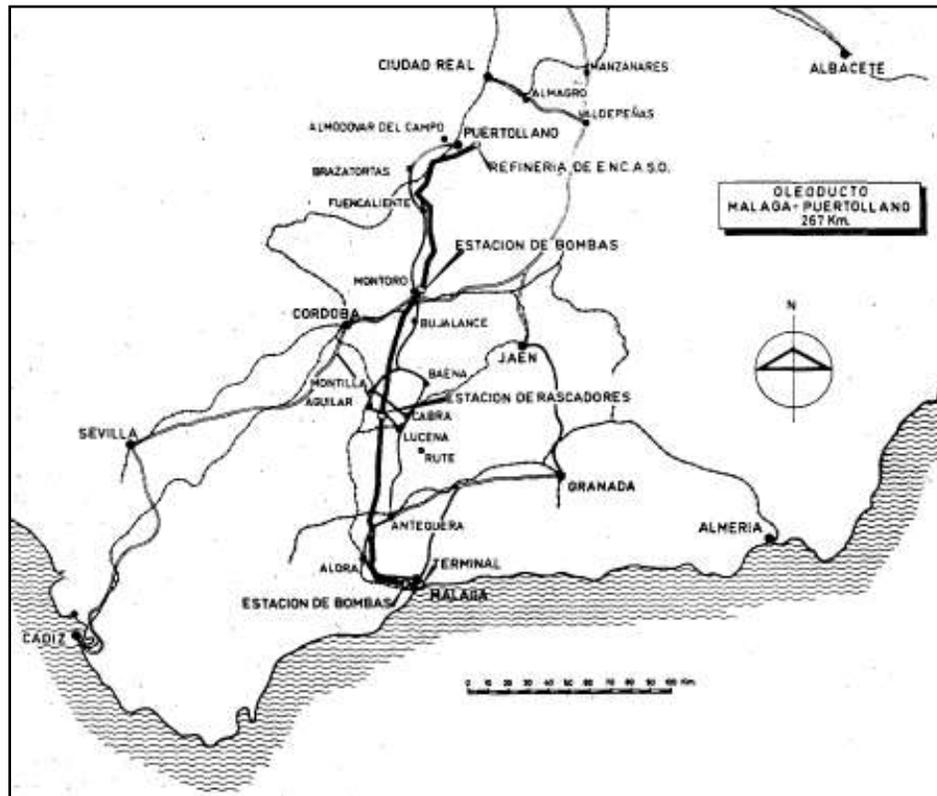
Estos documentos entre otros más del mismo contexto, no hacen un aporte al objetivo buscado en nuestro Estado del Arte de los Procesos de Soldadura para Sistemas de Transporte de Hidrocarburos.

Por las razones anteriormente expuestas y de acuerdo al estudio de la bibliografía aplicada, a continuación se observa un análisis de los documentos seleccionados, en donde se evidencia la aplicación de procesos de soldadura en oleoductos y gasoductos.

8.2.1 INICIOS CONSTRUCTIVOS EN OLEODUCTOS ESPAÑOLES.

E. Rodríguez Paradinas y E. Orozco Vallejo en su artículo⁵⁸, describen que durante la década de 1960 se registro un aumento en la demanda de productos petrolíferos en España, requiriendo de un oleoducto entre Málaga y Puertollano construyendo el primer gran oleoducto de transporte para uso civil.

Figura 15 – Planta del Oleoducto Málaga-Puertollano.



Fuente: Revista de obras públicas.

La construcción del oleoducto de 265 Km, mostrado en la **figura 15** se realizó en tubería de 16" de diámetro en acero de alta resistencia API 5L X42 y espesores de 11.12, 9.52, 7.92 y 5.56 mm según el perfil y líneas piezométricas del trazado, ver el trazado de la tubería en la figura 15.

⁵⁸ Rodríguez Paradinas, E., & Orozco Vallejo, E. (1967). El oleoducto Malaga-Puertollano Proyecto y Construcción de la Conducción Principal. *Revista de Obras Publicas* .

Se adjudica el trabajo a la firma italiana SNAM-SAIPEM del grupo *Ente Nazionale Idrocarburi*, los cuales inician labores en marzo de 1963 con la explanación y desbroce de la vegetación en el derecho de vía; posterior la recepción, entrega y transporte de la tubería hasta la pista en el derecho de vía del oleoducto finalizando en junio de 1964; la apertura de zanja de 1,2 m con excepción en cuerpos de agua y cruces ferroviarios terminando estas tareas en julio de 1963; continua el curvado en frío de los tubos de acuerdo a la planta-perfil requerida.

Siguiendo con el alcance de esta monografía se observa el uso del proceso de *soldadura SMAW* con electrosoldadores móviles, la alineación de la tubería se hace por medio de unas mordazas interiores apoyándose sobre soportes de madera, el número de cordones de soldadura depende del espesor del tramo soldado, el 1 de junio de 1963 se inician trabajos de soldadura hasta su fin en Junio de 1964.

Posterior a la soldadura de las juntas se realiza inspección radiográfica y ensayos del 10% de las soldaduras; al soldar tramos de un kilómetro de soldadura aproximadamente se les realiza limpieza y primeros ensayos haciendo pasar un raspador por medio de aire a presión, luego se deja presurizada la línea y se comprueban fisuras con agua jabonosa en las juntas; un grupo especial de soldadura une los tramos ensayados anteriormente y después se efectúa el revestimiento por medio de una maquina autopropulsada que corre sobre la tubería instalando una cinta de plástico autoadhesiva de polietileno recubierta por un fieltro de amianto, luego por medio de equipos de tractores de grúa lateral se va depositando los tramos en la conducción de la zanja este trabajo se llevo a cabo de Junio de 1963 a Septiembre de 1964.

Las tareas siguientes como relleno de zanja, cruces especiales y la restitución de los terrenos, permitieron la realización de la prueba hidrostática en tramos comprendidos entre 20 y 30 Km finalizando en Febrero de 1965 para inaugurar en Málaga el oleoducto el 6 de Octubre de 1965⁵⁹.

8.2.2 ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A LA CORROSIÓN EN PROCESOS CONVENCIONALES PARA OLEODUCTOS.

*Tavara Aponte y Barboza Rodríguez en su análisis*⁶⁰, para el proceso de soldadura SMAW en acero API 5L X52, estudian la susceptibilidad a la corrosión de dos tipos de juntas, en biseles "V" asimétricos (15° - 45°) a tope, soldados por un solo lado y cumpliendo con lo exigido en el estándar API 1104 y la especificación de API 5L, utilizando los electrodos revestidos E7018 y E6010, especificados bajo la norma AWS A5.1.

En la **tabla 8** se observa la composición y propiedades del acero API 5L X52 usado para la extracción de las dos juntas usadas en el análisis. Para llevar a cabo el estudio se realizaron dos juntas con diferentes aplicaciones, la junta 1 que lleva en todos los pases de soldadura el electrodo AWS E7018 es la que se practica en la

⁵⁹ IBÍD.

⁶⁰ Tavara Aponte, S. A., & Barboza Rodríguez, J. F. (2001). *Influencia de los cordones de soldadura sobre la resistencia a la corrosión del acero API 5L X52, en agua sedimentada de crudo de petróleo*. Trujillo - Peru.

unión de camisas de refuerzo de la tubería del Oleoducto Nor-Peruano, en zonas donde la tubería presenta daños mecánicos, fisuras y corrosión severa con pérdida del espesor de pared crítica para soportar las presiones de trabajo.

Tabla 8 – Composición química y propiedades mecánicas del acero API 5L X52.

%C	%Mn	%P	%S	Resistencia a la Tracción	Limite de Fluencia	Alargamiento
0,3	1,2	0,04	0,05	50,6 Kg/mm ²	36,6 Kg/mm ²	43%

Fuente: Estudio de susceptibilidad a la corrosión en dos tipos de juntas de acero API 5L X52.

De otra parte la junta 2 que lleva en el pase de raíz el electrodo AWS E6010 y en los demás pases el electrodo AWS E7018, es la que resultó tener las mejores propiedades mecánicas de una serie de juntas evaluadas para optimizar las propiedades mecánicas de las uniones del encamisado de refuerzo de tuberías de acero API 5L X52 del oleoducto Nor-Peruano.

También se realizó un análisis del contenido inclusionario por su influencia en el comportamiento a la corrosión de las juntas.

En la **tabla 9** se observa los electrodos revestidos usados en cada junta y la aplicación según el tipo de pase.

Tabla 9 – Tipos de juntas experimentales.

Junta	1	2
Pase de raíz (PR)	E-6010	E-7018
Pase en caliente (PC)	E-7018	E-7018
Pase relleno (PRE)	E-7018	E-7018
Pase de acabado (PA)	E-7018	E-7018

Fuente: Estudio de susceptibilidad a la corrosión en dos tipos de juntas de acero API 5L X52.

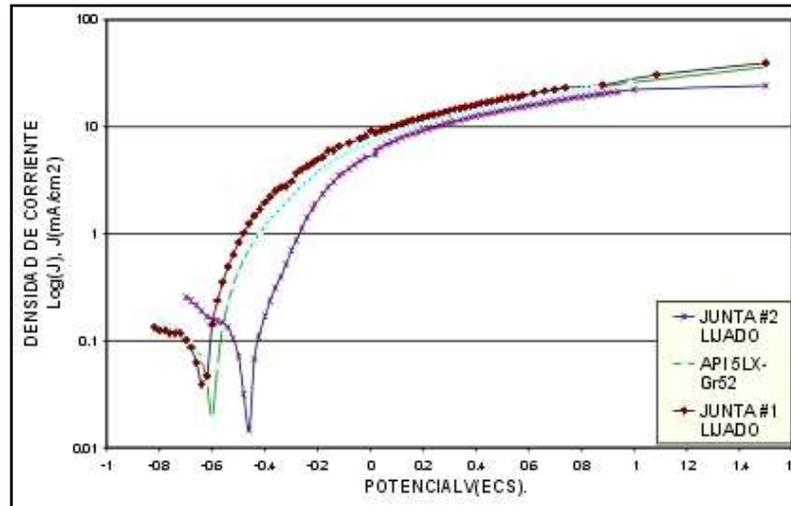
- **Ensayos electroquímicos de corrosión (ASTM: G1-72):** en la **figura 16** se observan los resultados de las probetas se obtenidas según la norma AWS A5.1-78, para el material de aporte puro, juntas soldadas y material base, fueron encapsuladas en resina epoxy, éste recubrimiento permitió dejar un área expuesta con una superficie perfectamente determinada de la probeta; se estableció el contacto eléctrico de cada probeta a través de un alambre de cobre revestido perfectamente unido a la probeta. La superficie expuesta, de las probetas, se las ensayó lijadas a 2000 mallas y en condiciones tal como quedaron después de la soldadura, previamente desengrasadas con acetato de etilo, enjuagadas con alcohol absoluto y secado con aire caliente, luego fueron montadas en la celda electroquímica⁶¹.

Previo a cada medición se permitió a las probetas alcanzar un potencial de corrosión estable por exposición a la solución durante un tiempo de 50 minutos

⁶¹ IBÍD. p 43.

[ASTM: G5-78]. Se determinó la densidad de corriente de corrosión utilizando el método lineal o de intersección de las pendientes de Tafel⁶², con ésta velocidad se calculó la velocidad de corrosión [ASTM: G3-74], los resultados se muestran en la **tabla 10**.

Figura 16 – Resumen de las curvas de polarización de las juntas y metal base.



Fuente: Estudio de susceptibilidad a la corrosión en dos tipos de juntas de acero API 5L X52.

Tabla 10 – Resultados de las curvas de polarización de la figura 16.

Parámetros	Junta 1	Junta 2	API 5L X52
Velocidad de corrosión	2,12 gr/cm ² .año	1,78 gr/cm ² .año	2,44 gr/cm ² .año
Velocidad de penetración	0,27 mm/año	0,23 mm/año	0,31 mm/año

Fuente: Estudio de susceptibilidad a la corrosión en dos tipos de juntas de acero API 5L X52.

La caracterización microestructural se realizó como se describe en la norma ASTM: E3-95. Para la identificación de inclusiones se usó el método de microscópico óptico mediante la comparación con gráficos patrones de la Norma ASTM: E45-84 y con las micrografías del Atlas M. Handbook vol. 7.

De esta manera la junta 1, a pesar que lleva en el pase de raíz el electrodo E6010 presenta un mejor comportamiento sobre la resistencia a la corrosión como junta soldada, por tener una buena penetración y fusión de la soldadura y presentarnos una superficie más uniforme y a pesar que ésta presenta una mayor cantidad de inclusiones no metálicas que la junta 2 que lleva en todos sus pases el electrodo E7018, la cual presenta baja penetración en el pase de raíz creando un concentrador para la rápida iniciación de la corrosión⁶³.

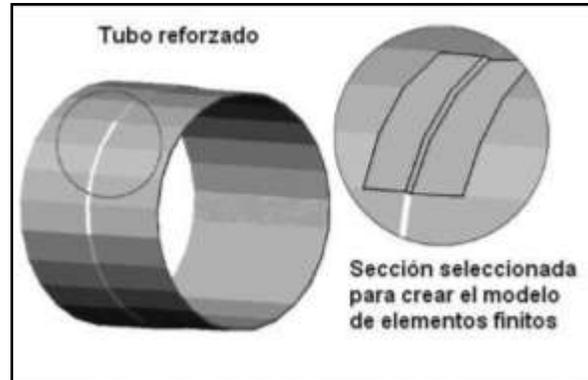
⁶² Calculado por medio de POURBAIX M. (1987) "Lecciones de corrosión electroquímica" CEBELCOR, Bruselas.

⁶³ Tavera Aponte, S. A., & Barboza Rodríguez. Op. Cit. p 49.

8.2.3 ANÁLISIS DE LA ENERGÍA CALORÍFICA DURANTE LA REPARACIÓN EN SERVICIO DE TUBERÍAS PARA OLEODUCTOS.

Ramos Morales, F., Duffus Scott, A., & Rodriguez Perez, M. en su artículo⁶⁴, y empleando el análisis por elementos finitos, estudiaron el comportamiento térmico durante la soldadura de reparación en condiciones de servicio de un tubo que transporta petróleo, se observa en la **figura 17** la sección seleccionada para el modelo estudiado.

Figura 17 – Tubo reforzado y sección seleccionada para la creación del modelo de elementos finitos.



Fuente: Análisis por elementos finitos [18].

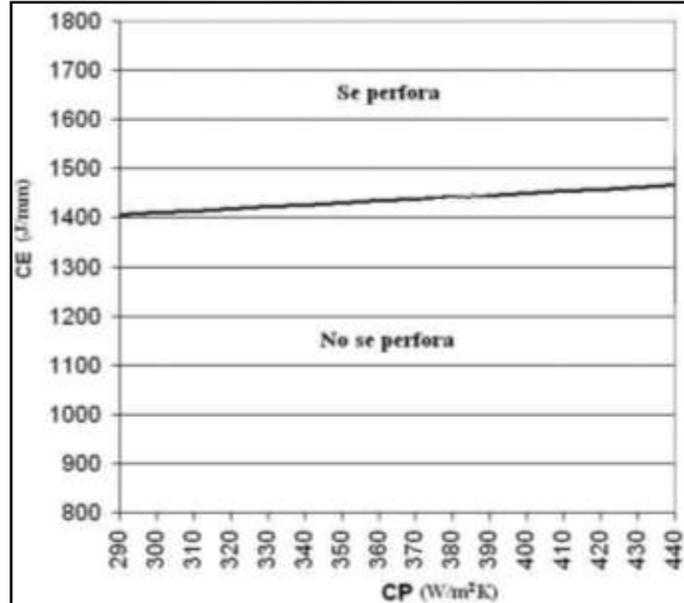
Se obtuvieron ecuaciones de regresión que relacionan a la temperatura máxima en la superficie interna del tubo y al tiempo de enfriamiento desde 800 °C hasta 500 °C de un punto situado en la zona afectada por el calor (ZAC), parámetros que gobiernan la ocurrencia de perforaciones en la pared del tubo y agrietamiento en frío respectivamente, con el calor de entrada de la soldadura, la temperatura de precalentamiento y el coeficiente de transferencia de calor por convección, variables que definen el comportamiento térmico durante la ejecución del proceso de soldadura.

Se probó la existencia de una zona en que se satisfacen simultáneamente las ecuaciones obtenidas, para diferentes combinaciones de las variables relacionadas. Se presentaron nomogramas, los cuales se observan en la **figura 18** con un importante valor práctico, desarrollados a partir de la solución de las ecuaciones obtenidas.

Los resultados obtenidos en esta investigación nos muestran ecuaciones de regresión que relacionan al calor de entrada de la soldadura, la temperatura de precalentamiento y el coeficiente para la transferencia de calor por convección, con la temperatura máxima en la superficie interna del tubo y el tiempo de enfriamiento entre 800 °C y 500 °C de un punto situado en la ZAC. Estas ecuaciones poseen soluciones comunes para aceros con un $t_{8/5}$ crítico menor que 7 segundos y tal que se garantice que la temperatura máxima en la superficie interna del tubo no exceda 982 °C.

⁶⁴ Ramos Morales, F., Duffus Scott, A., & Rodriguez Perez, M. (2009). Energía Calorífica necesaria, durante la Soldadura en servicio de tuberías para el transporte de Petróleo. *Soldagem Insp. São Paulo, Vol. 14.* , Pag. 047 - 057.

Figura 18 – Nomograma para la determinación del aporte térmico para garantizar una $T_{max} < 982^{\circ}\text{C}$, sin emplear precalentamiento del tubo.



Fuente: Análisis por elementos finitos⁶⁵.

A partir de la solución de las ecuaciones obtenidas, es posible seleccionar niveles de energía calorífica a aportar durante el desarrollo del proceso de soldadura, tal que se evite, simultáneamente, la ocurrencia de perforaciones en la pared del tubo y de agrietamiento en frío en la ZAC.

Los nomogramas creados a partir de las ecuaciones generales obtenidas presentan gran valor práctico para la selección de las condiciones en que se ha de desarrollar el proceso de soldadura. Las ecuaciones y nomogramas son válidos para los siguientes intervalos de valor de las variables consideradas:

1. Temperatura de precalentamiento entre 50°C y 200°C .
2. Coeficiente de transferencia de calor por convección entre $290 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ y $440 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.
3. Calor de entrada de la soldadura entre 810 J.mm^{-1} y 1625 J.mm^{-1} .
4. Aceros de baja aleación de acuerdo a la especificación API 5L.
5. Espesor del tubo de 6,4 mm.

⁶⁵ IBÍD. p 55.

8.2.4 EVALUACIÓN DE PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA MANUAL Y SEMIAUTOMÁTICOS EN ACEROS MICROALEADOS PARA LÍNEAS DE TRANSPORTE.

Zalazar, M., Ramini de Rissone, M., Surian, E., Bruna, R., & Baralla, E. ⁶⁶ en su artículo, comparan las propiedades mecánicas y la microestructura del acero HIC (Hydrogen induced cracking) aleado al Nb-Ti- Cu-Ni y resistente a la corrosión, con el acero normal NOR microaleado con Nb-V-Ti. En la **tabla 11**, se observa las composiciones químicas y propiedades de los metales base usados en el artículo.

Tabla 11 – Composición química y propiedades de los metales base.

Elementos	Acero	
	HIC	NOR
%C	0,05	0,12
%Mn	1,0	1,27
%Si	0,21	0,18
%P	0,013	0,008
%S	0,002	0,003
%Al	0,036	0,045
%Nb	0,042	0,037
%V	0,003	0,075
%Ti	0,019	0,024
%Cr	0,021	0,021
%Cu	0,18	0,018
%Mo	0,006	0,01
%Ni	0,16	0,019
Ppm N	58	80
Ppm O	32	30
Ppm Ca	25	20
Ceq	0,24	0,38
Pcm	0,12	0,2
Resistencia a la tracción (MPa)	582	664
Limite de fluencia (MPa)	537	564
Alargamiento (%)	40	37

Fuente: Artículo de revista *Soldagem Insp. São Paulo*, Vol. 14⁶⁷.

La segunda etapa de este trabajo es analizar la resistencia a la corrosión SCC (Stress corrosion cracking) y HIC de los metales base y las juntas soldadas con estos procedimientos.

⁶⁶ Zalazar, M., Ramini de Rissone, M., Surian, E., Bruna, R., & Baralla, E. (2009). Efecto del procedimiento de soldadura sobre las propiedades de uniones soldadas de aceros microaleados para cañería. *Soldagem Insp. São Paulo*, Vol. 14, 036 - 046.

⁶⁷ IBÍD. p 38.

Para realizar la caracterización se llevaron a cabo soldaduras circunferenciales de tuberías fabricadas con ambos aceros diseñándose procedimientos para la utilización, el primero de ellos usando electrodos revestidos SMAW analizando dos consumibles de diferente procedencia (A y L) para todas las pasadas. Para el otro procedimiento, la primera pasada usando soldadura semi-automática con alambre macizo bajo CO₂ (GMAW) y el resto de las mismas con alambre tubular autoprotegido – selfshielded - (FCAW-S) un solo tipo de consumible (L). Las soldaduras fueron calificadas de acuerdo con el Código API 1104, y fueron identificadas con la caracterización respectiva de la **tabla 12**.

Tabla 12 – Identificación de las probetas para ensayos de soldabilidad Tekken.

Probeta	Acero	Proceso	1er. Pase			Pases siguientes		
			Electrod.	Diámetro (mm)	Calor Aportado (KJ/mm)	Electrod.	Diámetro (mm)	Calor Aportado (KJ/mm)
SAH	HIC	SMAW	E7010-A1	3	0,95	E8010-G	5	1,3
SLH	HIC	SMAW	E7010-A1	3	0,63	E8010-G	4	1,3
FLH	HIC	FCAW-S	ER70S-6	1,2	0,45	E91T8-G	2	1,2
SAN	NOR	SMAW	E7010-A1	3	0,61	E8010-G	5	1,5
SLN	NOR	SMAW	E7010-A1	3	0,65	E8010G	4	1,3
FLN	NOR	FCAW-S	ER70S-6	1,2	0,45	E91T8-G	2	1,2

Fuente: Artículo de revista Soldagem Insp. São Paulo, Vol. 14⁶⁸.

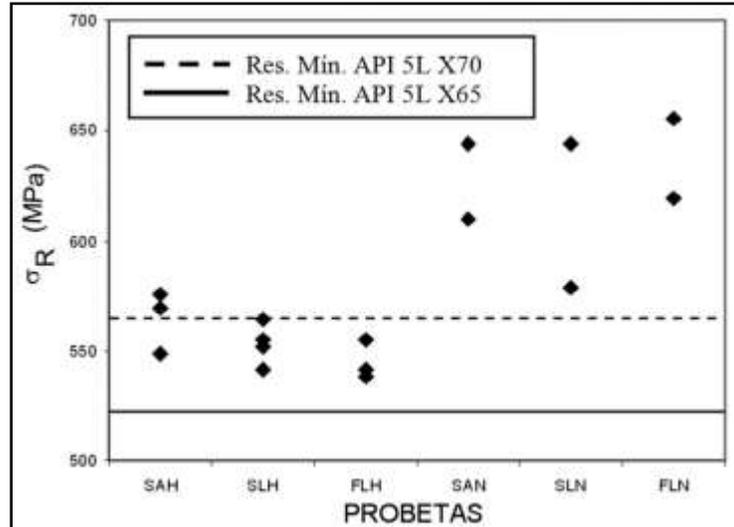
Los resultados de los análisis metalográficos y los ensayos mecánicos de tracción, dureza e impacto de las juntas soldadas revelaron la influencia de los consumibles de soldadura y del metal base en las propiedades de las uniones. Se observaron diferencias en las propiedades de las uniones soldadas con consumibles de igual especificación y distintos proveedores. De las diferentes combinaciones ensayadas se definieron valores óptimos para la soldadura de estos aceros. El gráfico de la **figura 19** muestra los valores de resistencia a la tracción de las probetas soldadas en las distintas condiciones. Se observa que las probetas soldadas con el acero HIC con distintos procesos y distintos consumibles alcanzaron los valores de resistencia a la tracción mínimos requeridos por el Código API 1104-99 para un acero API 5L X65 y las probetas soldadas con el acero NOR superaron los valores requeridos para un acero API 5L X70. En todos los casos ensayados la rotura se produjo en el MB.

Todos los procedimientos pudieron calificarse satisfactoriamente en ambos aceros, de acuerdo con el Código API 1104, *habiéndose utilizado una temperatura de precalentamiento de 75 °C, determinada a través de ensayos de soldabilidad Tekken,*

⁶⁸ IBÍD. p 39.

que responden a la norma JIS Z 3158. Del mismo modo todas las probetas soldadas alcanzaron los valores de resistencia a la tracción mínimos requeridos por el Código API 1104 para un acero API 5L X65, y las probetas soldadas con el acero NOR superaron los requisitos mínimos de tracción del Código API 1104 para un acero API 5L X70⁶⁹.

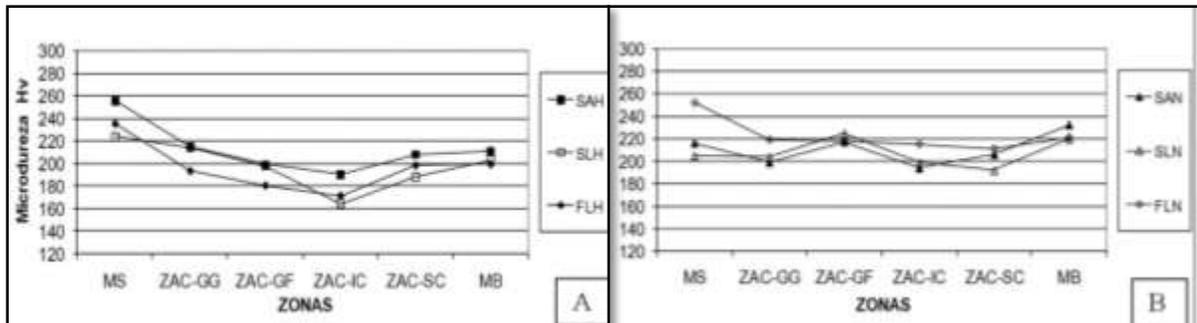
Figura 19 – Resultados del ensayo de tracción.



Fuente: Artículo de revista Soldagem Insp. São Paulo, Vol. 14.

Las diferencias de composición química entre los dos aceros, basadas en un menor contenido de carbono, agregado de cobre y níquel, con menor P_{cm} y C_{eq}, del acero HIC, se vieron reflejadas en menores valores de propiedades de tracción y dureza de los aceros, conservándose en las ZAC una vez soldados con los distintos procedimientos.

Figura 20 - Microdureza de las distintas zonas de la junta soldada. A: Acero HIC, B: Acero NOR.



Fuente: Artículo de revista Soldagem Insp. São Paulo, Vol. 14.

Las probetas soldadas con el acero HIC, con ambos procesos dieron valores de tenacidad mayores a las soldadas con el acero NOR, véase la **figura 20**. En todos los casos los valores de dureza de la ZAC no superaron los 22 HRc (248 Hv) que exigen las normas vinculadas con la resistencia a la corrosión⁷⁰.

⁶⁹ IBÍD. p 40.

⁷⁰ IBÍD. p 45.

8.2.5 DESARROLLO EN LOS ESTUDIOS COMPARATIVOS DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA MANUALES Y SEMIAUTOMÁTICOS EN OLEODUCTOS.

Rivadeneira Camino, A., & Serrano, O. en su informe⁷¹, realizan un estudio económico comparativo en todos los aspectos, como dilución, inspección visual, inspección radiográfica, ensayos y pruebas mecánicas entre los procesos SMAW y GMAW. En la **tabla 13**, se observan algunos resultados obtenidos durante las pruebas a los tubos soldados de material API 5L.

Tabla 13 – Designación de las muestras soldadas.

Designación de la muestra	Tipo de proceso aplicado	Tipo de técnica	Voltaje (V)	Corriente (A)
T1	SMAW	Vertical descendente	24,74	118,5
T2	GMAW	Vertical ascendente	21,37	131,25
T2A	GMAW	Vertical ascendente	19,75	125,26
T3	GMAW	Vertical descendente	82,5	121
T4	GMAW	Vertical descendente	30,86	113,6
T5	GMAW	Vertical descendente	19,86	133,5
T6	GMAW	Vertical ascendente	18,55	149,75
T7	GMAW	Vertical ascendente	15,44	150,84
T8	SMAW + GMAW	Vertical descendente	32,5	115,5

Fuente: Estudio comparativo de los procesos SMAW y GMAW, página 3.

Inspección visual este procedimiento de ensayos puede rechazar cualquier cordón de soldadura sin la necesidad de realizar otro ensayo no destructivo, los parámetros de aceptación de la tubería soldada en la inspección visual son:

- El pase de cubierta o sobre-monta no debe tener niveles inferiores al que dado por el diámetro exterior del tubo. Ni tampoco niveles superiores a 1/16 de pulgadas del diámetro superior al tubo.
- Este cordón también solapa a los biselados de la junta en 1.5 mm por cada lado, si existen cordones con menores o mayores proporciones de el ancho establecido por la norma, este es criterio el cual puede ser empleado para el rechazo de la tubería soldada.
- Existencias de mordeduras, poros, fisuras en la superficie del cordón que se encuentran dentro de los rangos de 12.45 % del espesor del tubo.

⁷¹ Rivadeneira Camino, A., & Serrano, O. (1998). *Estudio comparativo de los procesos de soldadura SMAW y GMAW en las uniones de tuberías de transporte de combustible.*

A la tubería luego de haber realizado el proceso de soldadura, se procedió a la limpieza con cepillos de discos trenzados (ver **figura 21**) y se empleo una lupa de 4X para la inspección visual en todo el contorno del cordón.

Figura 21 – Proceso de limpieza de la junta.



Fuente: Estudio comparativo de los procesos SMAW y GMAW, pagina 5.

La inspección radiográfica, bajo un procedimiento radiográfico se realizo a todos las uniones soldadas bajo una técnica de doble pared con simple imagen, la película utilizada es D7, y con un equipo de radiación SEIFERT de 300 kilovoltios. El ensayo de tracción y de doblado, se le realizo a las probetas donde se obtuvieron los mejores resultados de la inspección visual, radiográfica y dilución.

Tabla 14 – Resultado del ensayo de dureza para las muestras soldadas con SMAW.

Sección	Dureza HRb
Material base	85,51
ZAC	87,77
Material de aporte	89,71
ZAC	86
Material base	85,79

Fuente: Estudio comparativo de los procesos SMAW y GMAW, pagina 9.

Para los ensayos de dureza (**tabla 14 y tabla 15**), se observa que las muestras soldadas con el proceso de soldadura GMAW poseen mayor dureza, esto se lo puede atribuir a que por ser pases de soldaduras aplicados, se mantuvieron los niveles de dureza esperados.

Tabla 15 – Resultado del ensayo de dureza para las muestras soldadas con GMAW.

Sección	Dureza HRb
Material base	84,72
ZAC	88,13
Material de aporte	93,00
ZAC	89,25
Material base	85,58

Fuente: Estudio comparativo de los procesos SMAW y GMAW, pagina 9.

Para el análisis económico de los procesos de soldadura tomaron en cuenta de manera general los siguientes factores⁷²:

- Tiempo de preparación de la junta soldar.
- Tiempo de ensamble.
- Tiempo de punteo o armado.
- Tiempo de posicionamiento.
- Tiempo de soldadura.
- Tiempo de parada, en donde se considera los tiempo del cambio del electrodo, tiempo de movilización de estación, tiempo de cambio de los parámetros de soldadura, etc.
- Tiempo gastado por la cuadrilla.
- Tiempo de limpieza.
- Tiempo de desensamble.
- Tiempo de alivio de tensiones.
- Costo del electrodo.
- Costo de los materiales protectores.
- Costo de la potencia eléctrica.
- Costo de los activos fijos (Overhead).

Para los procesos SMAW y FCAW el análisis de costo de los productos de protección no es considerado⁷³, ya que en los precios del electrodo se toma en cuenta el fundente. En el consumo de electrodo por pie de soldadura hay que considerar la eficiencia del depósito del material de soldadura, la eficiencia del depósito nos indica, las libras de material depositado por cada libra de electrodo, para el proceso de electrodo revestido la eficiencia del depósito es de aproximadamente del 60% al 70%, en cambio para el proceso GMAW con gas protector la eficiencia es del 100%.

De esta forma el estudio concluye que el proceso de soldadura GMAW es más rápido que el proceso SMAW proporcionando mayor cantidad de material depositado en la junta soldada, por lo que el tiempo de ejecución de las juntas fue menor que con el proceso de soldadura por electrodo revestido.

El proceso de soldadura GMAW no es aconsejable aplicarlo en zonas donde las condiciones ambientales son adversas, tales como alta velocidad del viento, temperatura ambiente baja, o zonas lluviosas. En estas condiciones, es mejor soldar con el proceso SMAW.

⁷² IBÍD. p 10.

⁷³ IBÍD. p 11.

8.2.6 DESARROLLO EN LOS ESTUDIOS COMPARATIVOS DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA MANUALES Y SEMIAUTOMÁTICOS EN OLEODUCTOS - 2ª PARTE.

Codega, D., & Zalazar, M. en su artículo⁷⁴, analizó el comportamiento a fisuración en frío de dos aceros API 5L X70 uno considerado normal y otro desarrollado para ser resistente a la fisuración por hidrógeno (HIC) de 8,7 mm y 6,3 mm de espesor respectivamente, empleadas en la fabricación de tuberías, ver la composición en **tabla 16**.

El proceso de soldadura manual con electrodo revestido SMAW sigue siendo el más utilizado en la soldadura de tuberías si bien actualmente con el avance de los procesos de soldadura automática y semiautomática es importante el crecimiento de los procesos de soldadura con alambre tubular sin protección gaseosa FCAW - S. Si bien en la actualidad se cuenta con todos los elementos para la formulación óptima de consumibles para aceros estructurales de baja y media resistencia, no ocurre lo mismo en el campo de la soldadura de aceros de alta resistencia, en el rango de los 600-900 MPa de resistencia a la tracción. En tal sentido no se dispone del conocimiento adecuado de la metalurgia física de las aleaciones involucradas que relacionen las condiciones de soldadura, la composición química y la microestructura con las propiedades mecánicas resultantes. Generalmente, ante la falta de dicho conocimiento se sobredimensionan los requerimientos en la fabricación de la construcción soldada.

En la realización de soldaduras de aceros de alta resistencia, se busca eliminar los mecanismos de fisuración por hidrógeno mediante la obtención de la temperatura óptima de precalentamiento y entre pasadas. En aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA), la obtención de dicha temperatura no es un proceso simple y se recurre a la realización de ensayos de fisuración en frío.

El riesgo de fisuración en frío ocurre cuando existen conjuntamente, presencia de hidrógeno difusible, microestructura susceptible, tensiones de tracción y temperatura cercana a la ambiente⁷⁵.

Una manera clásica de evitar la fisuración por hidrógeno es a través del precalentamiento de la junta a soldar. Esto disminuye la velocidad de enfriamiento de la soldadura y reduce la probabilidad de formación de microestructuras peligrosas en la ZAC y en metal de aporte. La temperatura de precalentamiento actúa sobre la velocidad de difusión del hidrógeno y reduce las tensiones residuales disminuyendo los gradientes térmicos asociados a la soldadura⁷⁶.

El fenómeno de fisuración en frío es de tal importancia práctica que se han desarrollado numerosos ensayos para estudiar la susceptibilidad de un material a la misma, permitiendo establecer temperaturas de precalentamiento y entre pasadas adecuadas que garanticen una soldadura libre de fisuras⁷⁷.

⁷⁴ Codega, D., & Zalazar, M. (2007). Evaluación de la susceptibilidad a la fisuración en frío en soldaduras multipasada. *Congreso SAM/CONAMET 2007*, (pág. 6). San Nicolás, Argentina.

⁷⁵ N. Bailey, F. Coe, T. Gooch, P. Hart, N. Jenkins, R. Pargeter. *Welding steels without hydrogen cracking*, Abington publishing, 1990.

⁷⁶ H.J. Quesada. *Evaluación de la susceptibilidad a la fisuración en frío en soldaduras de aceros de alta resistencia*. Tesis de Maestría, 2002.

⁷⁷ H.J. Quesada, M. Zalazar y E.P. Asta. *Evaluación a la fisuración en frío de un acero de alta resistencia*. Jornadas SAM 2000, 599-606, Agosto de 2000.

Se realizaron ensayos de fisuración en frío denominados “BEAD BEND TEST” a distintas temperaturas de precalentamiento: 25°C, 50°C, 75°C y 100°C y de acuerdo al procedimiento propuesto por el documento del Instituto Internacional de Soldadura (IIW) N° II-1566-05 “*Investigation of HAC – susceptibility of multi layer welds with the BED BEND TEST*”.

Tabla 16 – Composición química y carbono equivalente Metales Base.

Elementos	Acero API 5L	
	X70 - HIC	X70 - N
%C	0,04	0,12
%Mn	1,0	1,27
%Si	0,2	0,18
%P	0,009	0,008
%S	0,002	0,003
%Al	0,038	0,045
%Nb	0,043	0,037
%V	0,003	0,075
%Ti	0,022	0,024
%Cr	0,018	0,021
%Cu	0,17	0,018
%Mo	0,005	0,01
%Ni	0,16	0,019
Ppm N	58	80
Ppm Ca	25	20
Ceq	0,23	0,38
Pcm	0,11	0,19

Fuente: Estudio de Fisuración en frío en soldaduras multipasada SMAW y FCAW⁷⁸.

Se utilizaron dos procesos de soldadura, SMAW y FCAW - S sin protección gaseosa. En todos los casos se soldó la pasada de raíz con proceso SMAW con un electrodo celulósico E7010-A1. Los consumibles empleados para el relleno fueron según AWS E8010-G y E91T8-G respectivamente. Para el proceso SMAW se utilizaron consumibles de dos proveedores distintos pero igual clasificación AWS., esto dio lugar a tres condiciones de ensayo considerando procesos y consumibles.

La **tabla 17** muestra los resultados de los ensayos de fisuración en frío (fisura/no fisura) para cada una de las probetas soldadas. Se observa que en el proceso SMAW el uso del electrodo celulósico muestra fisuras para todas las condiciones de soldaduras en el acero normal y en el acero HIC a partir de 75°C de temperatura de precalentamiento no se observan fisuras. Si bien ambos aceros responden a la misma clasificación de la Norma API 5L vemos que tienen distinto CEQ y espesor y el acero Normal una tensión de rotura superior.

⁷⁸ Codega, D., & Zalazar, M. (2007). Op. Cit. p 60.

Esta diferencia en susceptibilidad a la fisuración entre los aceros estudiados era de esperarse ya que el HIC está diseñado para resistir la Fisuración por Hidrógeno en servicio.

Analizando los consumibles utilizados en el relleno vemos que el electrodo E8010(A) a 75°C no presenta fisuras. El resultado de los ensayos mostro que la temperatura óptima de precalentamiento y entrepasadas es variable según el tipo de acero y proceso utilizado. Para SMAW varía entre 75 y 100 °C mientras que para FCAW - S a temperatura ambiente no se observaron fisuras.

En el proceso FCAW - S el nivel de hidrogeno difusible del metal de aporte es menor que en el proceso SMAW con electrodos celulósicos, por lo que los ensayos realizados indicarían que se puede soldar sin precalentamiento.

Tabla 17 – Resultados del Ensayo BEAD BEND TEST.

Metal Base	Temp. (°C)	Electrodo	Probeta	Fisura / No Fisura (F/NF)	Comentario
API X70 Normal	25	E8010 – G (L)	SLN 25	F	Mucho
	50		SLN 50	F	Poco
	75		SLN 75	F	Muy poco
	25	E8010 – G (A)	SAN 25	F	Mucho
	50		SAN 50	F	Poco
	75		SAN 75	F	Muy poco
	25	E91T8 – G	FLN 25	NF	
	50		FLN 50	NF	
	75		FLN 75	NF	
API X70 HIC	25	E8010 – G (L)	SLH 25	F	Poco
	50		SLH 50	NF	
	75		SLH 75	NF	
	25	E8010 – G (A)	SAH 25	F	Mucho
	50		SAH 50	F	Poco
	75		SAH 75	NF	
	25	E91T8 - G	FLH 25	NF	
	50		FLH 50	NF	
	75		FLH 75	NF	

Fuente: Estudio de Fisuración en frio en soldaduras multipasada SMAW y FCAW⁷⁹.

Los resultados son comparables con ensayos de fisuración Tekken realizados anteriormente con los mismos metales base y consumibles, donde se determinó una mínima temperatura de precalentamiento de 75 °C para todos los casos analizados⁸⁰.

⁷⁹ IBÍD. p 62.

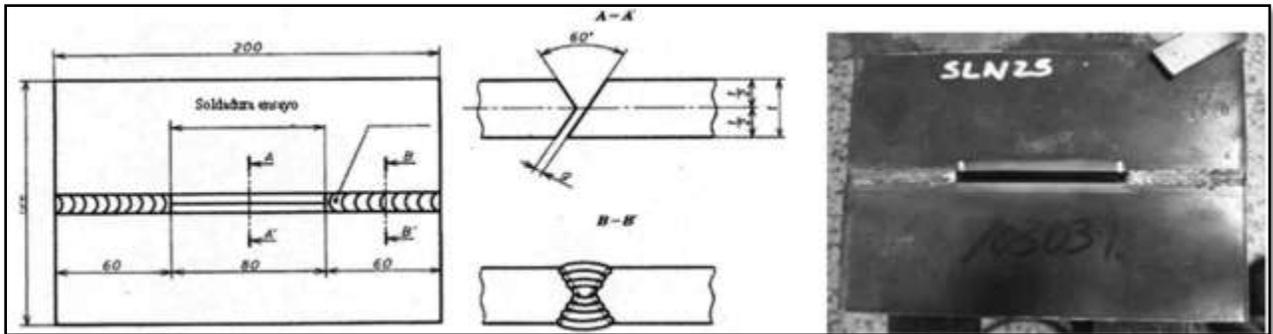
⁸⁰ Zalazar, M., Ramini de Rissone, M., Surian, E., Bruna, R., & Baralla, E. (2009). Op. Cit. p 45.

8.2.7 DESARROLLO EN LOS ESTUDIOS COMPARATIVOS DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA MANUALES Y SEMIAUTOMÁTICOS EN OLEODUCTOS - 3ª PARTE.

Zalazar, M., Ramini de Rissone, N. M., & Surian, E. S. en su artículo⁸¹, evalúan la soldabilidad de dos aceros desarrollados para ser utilizados en tuberías de alta presión, uno microaleado al Nb-V-Ti y otro al Nb-Ti-Cu-Ni, ambos tipo API 5L X65.

Las tuberías en líneas de transporte se sueldan mayormente con electrodos manuales revestidos celulósicos con progresión descendente (downhill welding), utilizándose en la raíz un electrodo que deposite un metal de menor resistencia mecánica que el utilizado en las pasadas siguientes; esto permite buena ductilidad en la unión y mejores condiciones operativas para el soldador. Los aceros microaleados están diseñados para tener buena tenacidad a bajas temperaturas de servicio, por lo que es importante utilizar un proceso de soldadura en el cual el material conserve sus propiedades después de ser soldado. En las soldaduras de cañería normalmente se utiliza un diseño de junta con ranura en "V" por lo que cuando se realizan los ensayos de tenacidad es importante determinar el porcentaje de las distintas regiones involucradas en el ensayo.

Figura 22 – Esquema de la probeta de ensayo Tekken utilizada.



Fuente: Artículo de revista Soldagem Insp. São Paulo, Vol. 14⁸².

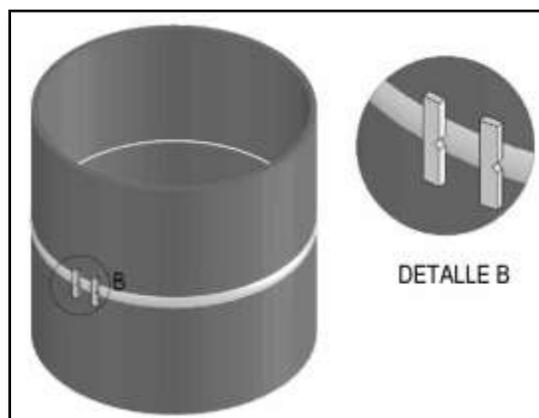
Se realizaron soldaduras circunferenciales de tuberías fabricadas con ambos aceros con dos procedimientos de soldadura: uno para la utilización de electrodos revestidos (SMAW) de distintos proveedores, para todas las pasadas; el otro soldando la primera pasada con alambre macizo bajo protección gaseosa de CO₂ (GMAW) y el resto con alambre tubular autoprotegido (FCAW-S), determinándose la temperatura de precalentamiento adecuada a través de ensayos Tekken, probeta y vista de la misma en la **figura 22**.

Se realizaron ensayos de tenacidad al impacto, Charpy-V, en tamaño sub-size de 10x5x55 mm, a tres temperaturas (-60, -20 y 20 °C), con dos ubicaciones de entalla: en metal de soldadura y en ZAC. Se ensayaron 3 probetas para cada condición (temperatura y posición de la entalla), extraídas de los cupones soldados según indica la **figura 23**.

⁸¹ Zalazar, M., Ramini de Rissone, N. M., & Surian, E. S. (2007). Analisis de la soldabilidad de Aceros de cañerías microaleados utilizando dos procesos de soldadura. *Congreso SAM/CONAMET*, (pág. 6). San Nicolas, Buenos Aires.

⁸² Zalazar, M., Ramini de Rissone, M., Surian, E., Bruna, R., & Baralla, E. (2009). Op. Cit. p 37.

Figura 23 – Modelo de extracción de la probetas para ensayo Charpy – V.



Fuente: Análisis de soldabilidad de aceros API 5L microaleados⁸³.

En trabajos previos las soldaduras fueron calificadas de acuerdo con el Código API 1104 y se presentaron los resultados vinculados con la caracterización metalográfica, los ensayos de dureza y las propiedades mecánicas de estas soldaduras⁸⁴.

Se analizó la dispersión en las mediciones y en aquellos casos en que los valores obtenidos fueron muy bajos se realizó un corte en la zona central de la fractura a ambos lados; las secciones obtenidas se incluyeron en una resina acrílica y se prepararon metalográficamente para determinar el punto de inicio de la fractura y las regiones que la misma involucra.

En la **figura 24** se observan los resultados del ensayo de impacto Charpy-V, para las distintas juntas soldadas con la entalla ubicada en el metal de soldadura. Los gráficos presentan los valores individuales medidos en cada probeta y el valor promedio obtenido. Se encontró que los valores medidos de energía absorbida en el metal de soldadura a -60 °C son todos muy bajos.

A -20 °C se observó una zona de transición con valores de energía elevados y en algunos casos superiores a los medidos a temperatura ambiente. El mayor valor de energía promedio a -20 °C se obtuvo para el acero N; las probetas del acero H soldadas por el proceso SMAW, con el consumible A presentaron valores de energía mínimos muy bajos (11J), con una superficie de fractura frágil.

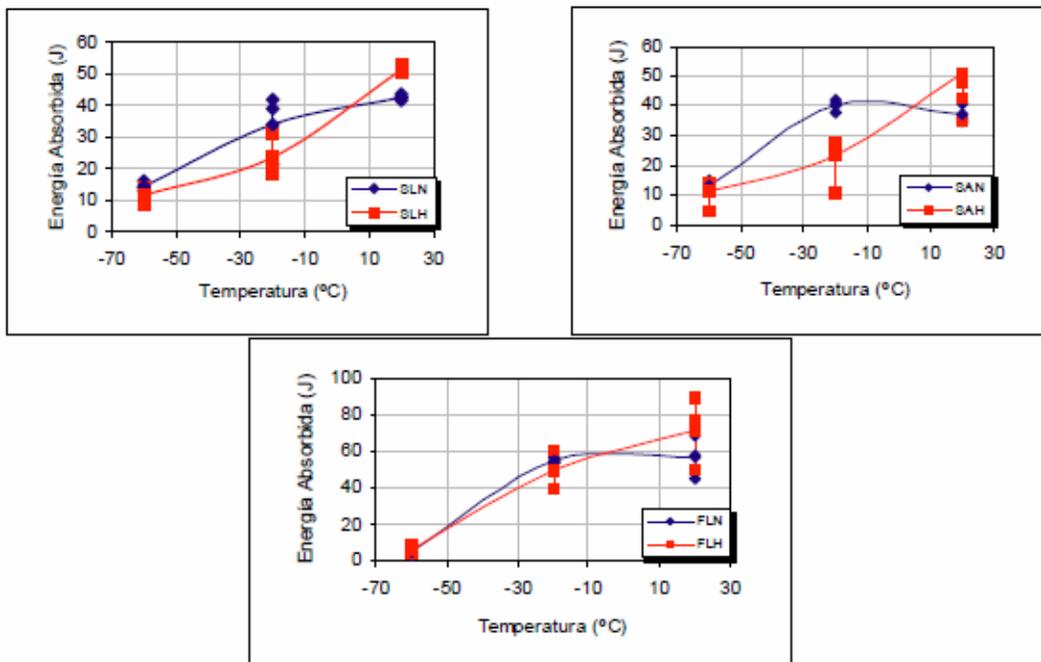
A 20 °C el valor de energía promedio más elevado se alcanzó para el acero H, para todos los casos y el mayor valor correspondió a la probeta soldada con por el proceso SMAW, utilizando el consumible L (51J).

Las probetas soldadas con GMAW-STT + FCAW mostraron los mayores valores de energía absorbidos para ambos aceros a 20 y -20°C.

⁸³ Zalazar, M., Ramini de Rissone, N. M., & Surian, E. S. (2007). Op. Cit. p 194.

⁸⁴ Zalazar, M., Ramini de Rissone, M., Surian, E., Bruna, R., & Baralla, E. (2009). Efecto del procedimiento de soldadura sobre las propiedades de uniones soldadas de aceros microaleados para cañería. *Soldagem Insp. São Paulo, Vol. 14*, 036 - 046.

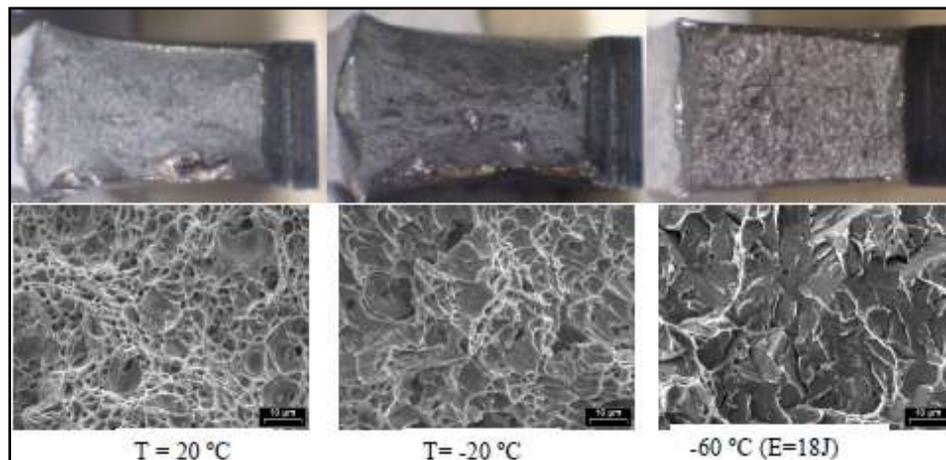
Figura 24 – Energías absorbidas vs. Temperatura de ensayo para el metal de soldadura.



Fuente: Análisis de soldabilidad de aceros API 5L microaleados [81].

La **figura 25** muestra las superficies de fractura para distintas temperaturas, observándose claramente un comportamiento frágil, sin labios de corte, en las probetas a -60 °C y dúctil a -20 °C y 20 °C.

Figura 25 – Superficie de fractura para la ZAC de las probetas obtenidas para la soldadura SAN, ver probetas en tabla 12⁸⁵.

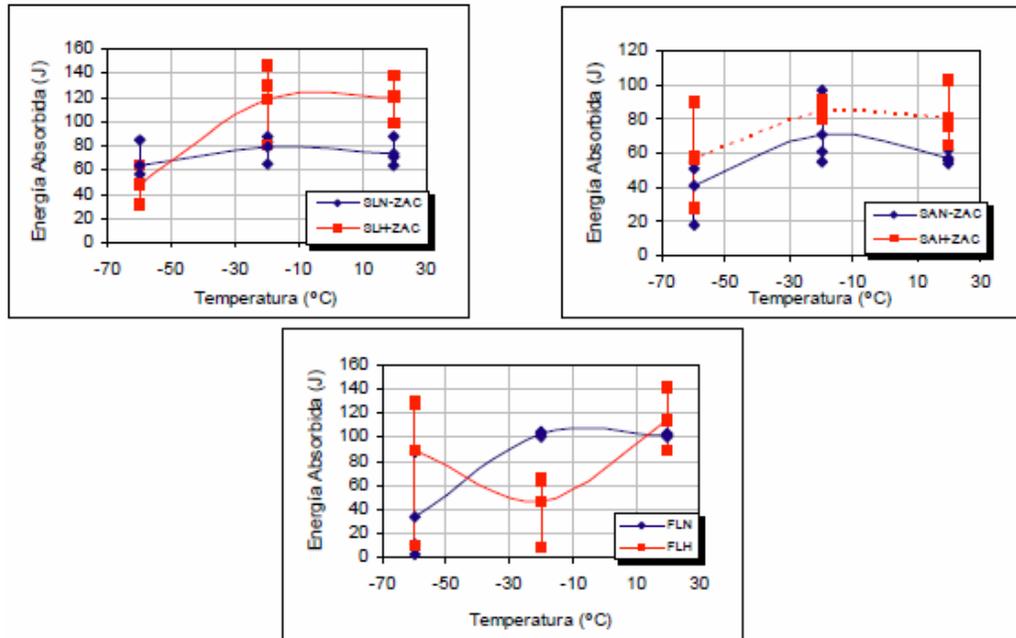


Fuente: Análisis de soldabilidad de aceros API 5L microaleados [81].

La **figura 26** muestra los resultados del ensayo de impacto Charpy-V para las juntas soldadas con la entalla en la ZAC, comparando con los resultados de la figura 24, se observa que los valores de impacto del metal de soldadura son menores a los de la ZAC.

⁸⁵ Ver página 51.

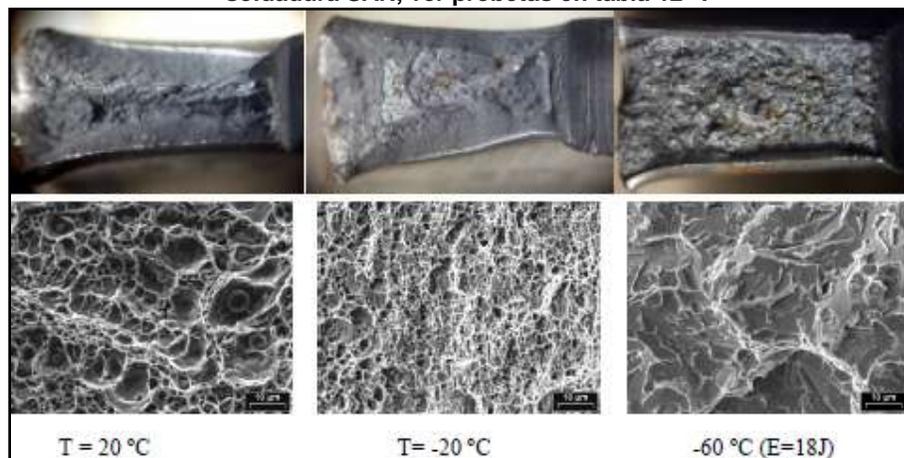
Figura 26 – Energías absorbidas vs. Temperatura de ensayo para la ZAC.



Fuente: Análisis de soldabilidad de aceros API 5L microaleados [81].

Analizando los valores obtenidos en las probetas soldadas por SMAW y ensayadas en la ZAC se observa que el acero HIC presentó valores más altos de energía absorbida, principalmente cuando se utilizó el consumible L. Este acero microaleado presenta menor porcentaje de carbono y tiene elementos tales como *Ni* que mejora la tenacidad. Las probetas soldadas con GMAW-STT + FCAW, muestran la misma tendencia, salvo en el caso de las ensayadas a -20°C, que dieron valores inferiores para el acero HIC.

Figura 27 - Superficie de fractura para el metal de soldadura de las probetas obtenidas para la soldadura SAN, ver probetas en tabla 12⁸⁶.



Fuente: Análisis de soldabilidad de aceros API 5L microaleados [81].

⁸⁶ Ver página 51

La **figura 27** muestra algunas superficies de fractura que representan a las observadas donde vemos un comportamiento mixto a las temperaturas ensayadas.

Para los dos aceros las probetas soldadas por el *proceso GMAW (pase de raíz) + FCAW-S* presentaron los mayores valores de energía absorbida en el ensayo de impacto Charpy-V, mayores incluso que los valores del MB, para ambos aceros.

8.2.8 EL PROCESO DE ALAMBRE TUBULAR EN AMBIENTES CORROSIVOS DE H₂S EN JUNTAS SOLDADAS DE ACERO API 5L - X80.

Hilton, J., Fals, H., & Trevisan, R. en su artículo⁸⁷, realizaron un estudio sobre la susceptibilidad al agrietamiento inducido por el hidrógeno de uniones soldadas de aceros API –X80 (vease la composición química y propiedades en la **tabla 18**), expuestas a un ambiente saturado en ácido sulfhídrico (H₂S). Fue empleado el ensayo G-BOP modificado. El proceso de alambre tubular, con dos metales de aporte, E71-T1 y E71-T8K6, fue usado, manteniendo constante los parámetros del proceso de soldadura. Las probetas fueron soldadas a temperatura ambiente y también tras precalentamiento a 100 °C.

Tabla 18 - Composición química (% en peso) y propiedades mecánicas del acero API 5L - X80.

Elementos	Acero API 5L – X80
%C	0,04
%Mn	1,75
%Si	0,17
%P	0,019
%S	0,004
%Al	0,032
%Nb	0,073
%V	0,005
%Ti	0,013
%Cr	0,21
%Cu	0,01
%Mo	0,016
%Ni	0,02
%N	0,0035
%B	0,0002
%Ca	0,0014
%Sb	0,01
Pcm	0,156
Resistencia a la tracción (MPa)	674
Límite de fluencia (MPa)	561
Alargamiento (%)	27
Dureza (HB)	206

Fuente: Revista Metalurgia [87].

⁸⁷ Hilton, J., Fals, H., & Trevisan, R. (2009). Susceptibilidad a grietas inducidas por hidrogeno en ambiente corrosivo de H₂S de juntas soldadas de acero API 5L - X80. *Revista de Metalurgia*, 45 (4), 267 - 276.

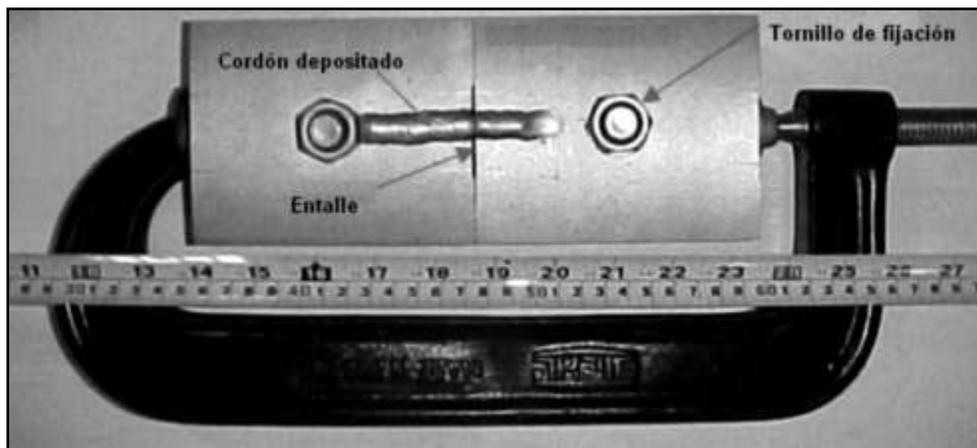
Para la soldadura se usaron dos alambres tubulares, uno, autoprotegido, E71T8-K6 (FCAW-S), con diámetro 1,7 mm y, el otro, con protección gaseosa de CO₂, E71T-1 (FCAW-SG), con diámetro 1,6 mm (AWS A5.29).

La selección de ambos alambres se basó en la semejanza de la composición química del depósito con el acero API-X80 y su especificación para la soldadura de oleoductos. Además, se consideró que sus depósitos garantizan obtener límites de fluencia inferiores al del material base, que posee un límite de fluencia de 561MPa, lo cual se recomienda para evitar la formación de grietas en la región fundida de aceros de alta resistencia y baja aleación. Esta técnica se aplica industrialmente y se conoce en la literatura como *Undermatched*⁸⁸.

Para el desarrollo del proceso se empleó una fuente de soldadura multiproceso y sinérgica. *El proceso de soldadura fue totalmente automatizado*, usando para el desplazamiento de la antorcha un sistema de velocidad controlada.

Los bloques soldados del ensayo G-BOP (vease **figura 28**) modificados empleados en esta investigación fueron expuestos a un ambiente saturado en H₂S, según recomienda la norma NACE TM0284. Los cordones de soldadura fueron caracterizados microestructuralmente y realizados análisis de hidrógeno residual en las probetas.

Figura 28 – Bloque de ensayo G-BOP.



Fuente: Revista Metalurgia [87].

El procedimiento nos ayudara a evaluar la fragilidad inducida por el hidrógeno en chapas de aceros destinados a la construcción de recipientes a presión y tuberías.

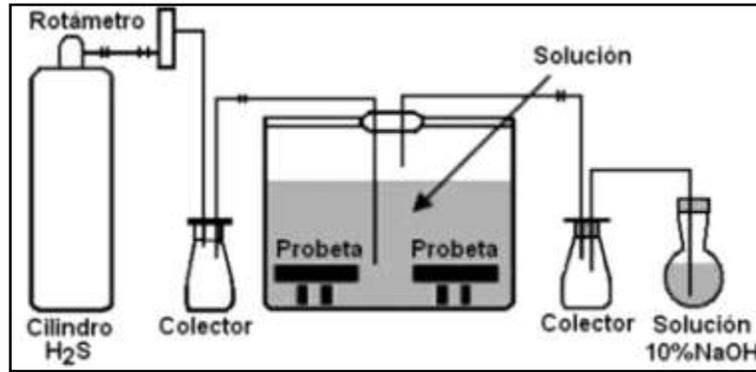
Este consistió en introducir en la célula de corrosión (**figura 29**), las probetas soldadas del ensayo G-BOP, después de haber sido enfriadas hasta la temperatura ambiente. En correspondencia con la norma NACE TM0284, el ensayo comenzaba después de 60 min de introducción de H₂S en el sistema.

Las probetas del ensayo G-BOP, fueron expuestas a una solución de cloruro de sodio (NaCl) y ácido acético (CH₃COOH) (solución A / NACE TM0284), saturada con

⁸⁸ D.K. Miller, J. Hietpas y R. Depue, *Weld. J.* 81 (2002) 40-45.

H₂S a temperatura ambiente y presión constante, durante 96 h. El pH inicial de la solución fue de 2,7 (±0,1) y el final no debía ser superior a 4,0, para que el ensayo fuera considerado válido.

Figura 29 – Representación esquemática de la célula de corrosión usada para evaluar las grietas inducidas por el hidrogeno en presencia de H₂S (NACE TM0284).



Fuente: Revista Metalurgia [87].

Después de realizado el ensayo se retiró el elemento de fijación. Luego, fue aplicado un calentamiento localizado sobre el cordón de soldadura en la región de la entalla, con el objetivo de oxidar la zona de la sección transversal del cordón que se había agrietado y permitir su identificación. Después, se realizó la abertura de las probetas, fijando una de las partes, y aplicando un impacto sobre la otra.

Tabla 19 – Agrietamiento inducido por el hidrogeno. Probetas soldadas sin precalentamiento.

Alambres	Nº Probeta	A _{CS} (mm ²)	A _A (mm ²)	G _H (%)
E71T-1	1	42,5	31,9	75,1
	2	42,7	33,6	78,6
	3	41,6	29,6	71,2
	4	43,6	35,8	82,2
	5	41,5	29,1	70,2
E71T8-K6	11	50,9	40,3	79,3
	12	49,2	39,6	80,5
	13	49,9	43,6	87,3
	14	51,7	49,0	94,8
	15	51,6	44,0	85,3

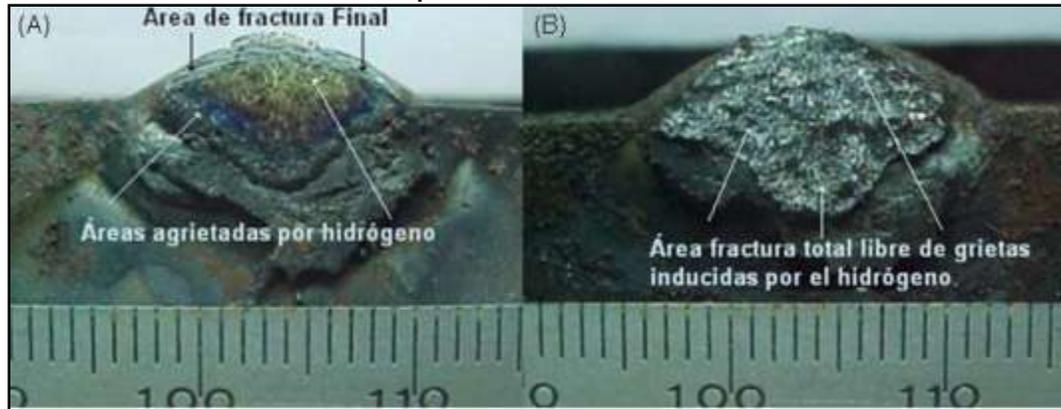
Fuente: Revista Metalurgia [87].

Se observaron y calcularon las áreas de las superficies de fractura de las grietas inducidas por el hidrógeno y se analizaron los modos de fractura ocurridos, el factor GH usado en el ensayo G-BOP para calcular el porcentaje de grietas de carbono (ver **tabla 19**).

Se destaca, en la **figura 30**, que las probetas soldadas con precalentamiento de 100 °C , presentaron una única morfología de fractura, que correspondía a la fractura del cordón de soldadura que tuvo lugar durante la apertura de la probeta de ensayo, lo

que demuestra la no aparición de grietas inducidas por el hidrógeno en estas condiciones experimentales. Se constató que el precalentamiento a 100 °C fue suficiente para evitar el agrietamiento.

Figura 30 – Macrografías de las fracturas de los cordones de soldadura. A) Probeta soldada con el alambre E71T8-K6 a temperatura ambiente. B) Probeta soldada con el alambre E71T8-K6 precalentada a 100 °C.



Fuente: Revista Metalurgia [87].

Los resultados más importantes los siguientes:

- La metodología propuesta en esta investigación, promovió la absorción de hidrógeno, que fragilizó y aumentó la susceptibilidad al agrietamiento del cordón de soldadura.
- El depósito obtenido con el alambre tubular autoprotectido E71T8-K6 fue más susceptible al agrietamiento inducido por el hidrógeno.
- La concentración de hidrógeno residual fue el factor que más influyó en la formación de grietas en el cordón de soldadura, aunque también la microestructura del metal depositado juega un papel destacado.
- La temperatura de precalentamiento de 100 °C fue suficiente para evitar la formación de grietas inducidas por el hidrógeno, a pesar del ambiente saturado en H₂S.
- El análisis de los micromecanismos de fractura permitió comprobar el efecto fragilizador del hidrógeno en el material, revelándose un mecanismo de fallo mixto, en el que el incremento del nivel de hidrógeno supone el aumento porcentual de los procesos de fractura frágil (clivaje).

8.2.9 PROCEDIMIENTO CALIFICADO DE PROCESO FLUX CORED ARC WELDING (FCAW) MEDIANTE TRANSFERENCIA PULSADA.

Gonzalez, J. C., & Soriano, G. G. en su tesis⁸⁹, califica un procedimiento de soldadura FCAW – G con un modo de transferencia pulsado siguiendo los procedimientos de la norma API 1104, apoyándose en las normas ASTM E23-91 y ASTM 370, realizando inspección visual, líquidos penetrantes y radiografía, ensayos

⁸⁹ Gonzalez, J. C., & Soriano, G. G. (2001). *Soldadura del acero API 5L - X52 mediante el proceso Flux Cored Arc Welding (FCAW) con transferencia pulsada*. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela.

destruictivos (Traccion, doblado de cara y raiz), ensayo Charpy – V, ensayo de Dureza y un barrido metalográfico. El proceso se califica en una tubería API 5L – X52 de 500 mm de diametro y 10 mm de espesor, en un diseño de juntas en V, sin talon de respaldo, donde se uso un alambre tubular de 1,6 mm AWS E71T-1 y proteccion gaseosa de Argón con 20% de Dioxido de Carbon (AGAMIX 20).

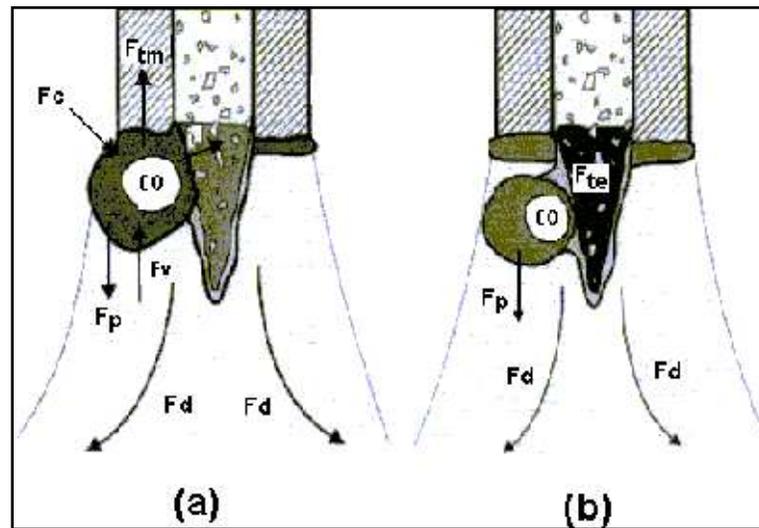
La obtención de los parámetros de pulso, fue realizada basándose en el criterio de Burnoff, descrito por Amin⁹⁰, en la cual se relacionó: la Velocidad de alimentación (VA) de 3 m/min con una Intensidad media de 165 Amp, y se obtuvieron los siguientes valores: Intensidad base (I_B) 50 Amp, Intensidad pico (I_P) 415 amp, tiempo base (t_B) 3,4 mseg, tiempo pico (t_P) 7,5 mseg.

Modo de transferencia metálica en FCAW.

La transferencia metálica en el proceso FCAW es una combinación de los tipos básicos de transferencia del proceso GMAW, es decir el metal puede ser transferido en forma globular, cortocircuito, spray y modo pulsado. El tipo de transferencia depende de la formulación del fundente interno así como también del voltaje y corriente del arco, según la AWS.

Souza⁹¹ explica que los diferentes tipos de transferencia metálica están relacionados con un balance de fuerzas que actúan en el desprendimiento de las gotas y por el tipo de proceso de soldadura usado. La **figura 31** representa estas fuerzas que actúan directamente sobre la punta del electrodo y estas son: peso (F_p), tensión superficial gota-cáscara metálica (F_{tm}), y gota escoria (F_{te}), fuerza electromagnética de Lorentz (F_c), fuerza de arrastre del plasma (F_d), fuerza de evaporación metálica (F_v), y la fuerza debido a las reacciones químicas (formación de burbujas de gases en el interior de la gota de metal fundido) (F_q).

Figura 31 – Esquema de las fuerzas que actúan en la transferencia metálica FCAW. A) Gota ligada físicamente a la cascara metálica, B) Gota ligada a la protección gaseosa.



Fuente: Trabajo especial de grado [89].

⁹⁰ Amin, M. "Pulse current parameters for arc stability and controlled metal transfer are welding". Metal Construction, vol. 15, n. 5, 1983, pag 272-278.

⁹¹ Souza P.C.R.D. "Análise da transferencia metálica na soldagem com arame tubular". Congreso V Ibero Americano de Soldagem, 1998

Wang y colaboradores⁹² definen las fuerzas de Lorentz como la causante del encuellamiento y la separación de las gotas de metal fundidas desde la punta del electrodo, estas se producen gracias a las fuerzas electromagnéticas que se generan cuando pasa la corriente a través del electrodo. La fuerza de tensión superficial depende del tipo de metal y del diámetro del alambre. La fuerza de arrastre debido al plasma colabora para la separación de la gota al igual que la de gravedad.

Adicionalmente establecen que comparado el FCAW con GMAW, el primero es más complicado debido a la interacción existente entre la cáscara metálica y el núcleo del electrodo. Una sección transversal de un alambre para FCAW es mucho menor que una de GMAW del mismo diámetro, por lo tanto la transferencia metálica en este alambre siempre ocurre a mayores densidades de corriente.

Dentro de la transferencia metálica del proceso FCAW se han observado tres etapas diferentes: formación y crecimiento de la gota, encuellamiento y desprendimiento. Dentro de la etapa de encuellamiento se encuentran dos subetapas, las cuales son similares a las del proceso de soldadura por arco sumergido (SAW).

En la primera de estas subetapas la gota está ligada a la cascara metálica y en la segunda subetapa esta se encuentra solamente ligada a la protección de la escoria que se encuentra en la punta del electrodo. En la primera etapa de formación y crecimiento de la gota la corriente fluye a través de la gota y la hace crecer, posteriormente comienza la segunda etapa en donde la acción de las fuerzas de Lorentz, de arrastre del plasma producida por el gas de protección, de tensión superficial gota-cascara metálica y gota escoria, peso, de las reacciones químicas y de evaporación metálica actúan de manera tal que logran producir el encuellamiento y la separación de gota desde la punta del electrodo.

Predicción de los parámetros de soldadura empleando arco pulsado para la estabilidad del arco y control de la transferencia metálica.

La predicción de los parámetros del pulso para corriente pulsada está basada en tres requerimientos esenciales para la técnica de soldadura MIG pulsado (GMAWP) usando alambre macizo.

CRITERIO DE BURNOFF.

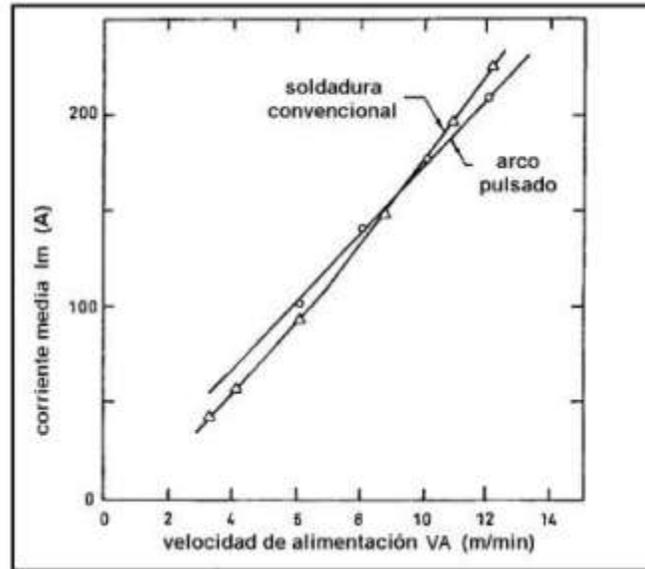
La consideración necesaria al trabajar con este método, es construir una relación funcional que represente todas las posibles condiciones de los parámetros del pulso (I_P , I_B , t_P , t_B), pertenecientes a una corriente media específica (I_M). Una vez seleccionadas las mejores combinaciones, los valores obtenidos de IM se grafican con sus respectivas velocidades de alimentación, obteniéndose una grafica como la **figura 32**.

Para la construcción de esta zona paramétrica se debe hallar como primer paso una relación entre la corriente media y la velocidad de alimentación en GMAW-P usado

⁹² Wang, W.; Lui S.; Jones J. E. "Flux Cored Arc Welding: Arc, Processing and metal transfer characterization". Welding Journal, vol. 74, n. 11, 1985, pag. 369 - 377.

parámetros experimentales según el siguiente procedimiento: realizar soldaduras tomando en cuenta varios parámetros de las mismas, los cuales se seleccionan por ensayo y error, tomando solamente en cuenta los de mayor estabilidad del arco y con una longitud del mismo más o menos constantes. El criterio es desarrollado y analizado en las páginas 17 a 22 de la tesis⁹³.

Figura 32 – Grafico del criterio de Burnoff para soldadura convencional y por arco pulsado.



Fuente: Trabajo especial de grado [89].

Otros criterios de predicción de los parámetros del pulso son: *Criterio de la transferencia metálica* establece que a pesar de que todas las condiciones del pulso expresadas por la ecuación 5 en la zona paramétrica podrían satisfacer el criterio de “Burnoff”, algunas combinaciones podrían no producir transferencia metálica tipo spray, si I_p e I_B no fuesen suficientemente aptas como para transmitir el volumen de gota requerido. Así que la zona paramétrica debe ser limitada para lograr satisfacer el criterio de la transferencia metálica.

El Criterio de estabilidad del arco se basa en la necesidad de limitar la corriente base debido a que el arco no es estable para todos los valores de este parámetro, sobre todo en los valores más bajos.

Resultados experimentales y análisis.

Luego de conocer los criterios para establecer las condiciones y parámetros del pulso, en la tesis se procede a definir los siguientes valores:

- a. Caracterización química y mecánica del material y depósito.
- b. Selección de los parámetros de soldadura:
 - ✓ Criterio de Burnoff.
 - ✓ Diámetro metálico del alambre tubular.
 - ✓ Calculo del volumen teórico de la gota.

⁹³ Gonzalez, J. C., & Soriano, G. G. (2001). *Soldadura del acero API 5L - X52 mediante el proceso Flux Cored Arc Welding (FCAW) con transferencia pulsada*. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela.

- ✓ Cálculo del tiempo del ciclo para la transferencia pulsada.
- ✓ Parámetros teóricos de la transferencia pulsada.
- ✓ Parámetros de soldadura: determinación del parámetro óptimo, oscilogramas de pulso, determinación de la penetración y altura del cordón.
- c. Cupones de prueba.
- d. Ensayos no destructivos.
 - ✓ Inspección visual.
 - ✓ Inspección por líquidos penetrantes.
 - ✓ Inspección por radiografía.
- e. Ensayos mecánicos (destructivos).
 - ✓ Ensayo de tracción.
 - ✓ Ensayo de doblez.
 - ✓ Ensayo Charpy.
- f. Macrografía.
- g. Ensayo de dureza.
- h. Micrografías.
- i. Registro del procedimiento de soldadura (RCP).

Al finalizar la tesis los autores concluyen que:

- La evaluación del procedimiento de soldadura FCAW-G con transferencia pulsada, aplicado en la tubería API 5L-X52, califica según la norma API 1104.
- El criterio de Burnoff para la selección de los parámetros de arco pulsado es aplicable al proceso de soldadura con alambre tubular.
- Los parámetros del arco pulsado calculados, $V_A = 3$ m/min, $I_P = 415$ amp, $I_B = 50$ amp, $t_P = 3,4$ mseg y $t_B = 7,5$ mseg, garantiza una adecuada calidad en las juntas soldadas.
- La soldadura FCAW-G con transferencia pulsada, reportó un excelente acabado superficial con escasas salpicaduras y porosidades.
- Las propiedades mecánicas evaluadas en las juntas soldadas FCAW-G con transferencia pulsada, cumplen con los requerimientos establecidos en la norma API 1104.

8.2.10 NUEVOS PROCESOS DE SOLDADURA IMPLEMENTABLES EN LA CONSTRUCCION DE GASODUCTOS.

Coloma Vera, P. A. en su tesis⁹⁴, en el tercer caso de su estudio establece la planeación de las actividades de soldadura para el pilotaje de las instalaciones marítimas de un proyecto LNG en la costa peruana, ver **figura 33**.

En este caso el autor tiene como objetivo la elaboración y comparación técnico económica de los diferentes procedimientos posibles de soldadura a ser utilizados en taller de fabricación de pilotes y en el montaje de las estructuras sobre los pilotes hincados. Se planificará la soldadura del pilotaje. Se soldarán 540 pilotes los cuales están constituidos por secciones tubulares de material API 5LX52 y API 5LX65 en diámetros de 32" a 48". Los espesores a soldarse variarán desde 0.866" hasta 1.5".

⁹⁴ Coloma Vera, P. A. (2007). *Planificación, construcción y reparación de construcciones soldadas: análisis de tres casos*. Lima - Peru: Pontificia Universidad Católica del Perú.

Figura 33 – Vista de las instalaciones portuarias del proyecto LNG en Pampa Melchorita – Perú.



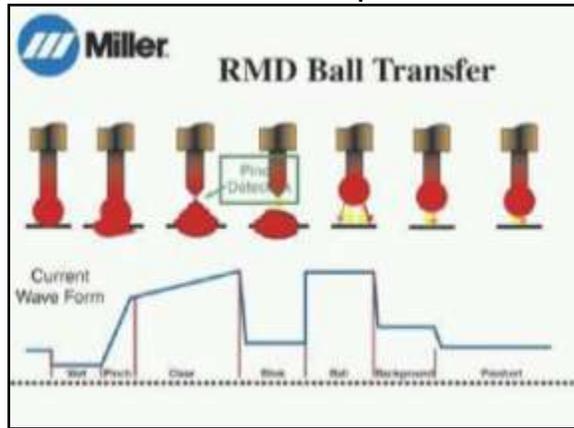
Fuente: Tesis PUCP [94].

Los pilotes estarán formados por la unión de secciones de 12m de estas tuberías. Cada pilote estará formado por tres tuberías soldadas. A esta soldadura se le llamará soldadura de taller (shop welding). Existirán uniones soldadas entre espesores desiguales sin respaldo y se permite la soldadura con respaldo (backing) metálico para las uniones de espesores iguales. Los pilotes soldados serán clavados en el mar y en el extremo superior del mismo será soldado a las estructuras del muelle (trestle) con juntas de surco (groove welds) de penetración completa soldadas desde un solo lado. A esta soldadura se le llamará soldadura de campo (field welding).

Para este proyecto se plantea una solución basada en los siguientes ítems:

- El pilotaje y las estructuras del muelle serán fabricados cumpliendo los requerimientos del API RP2A WSD (Design and Construction of Fixed Offshore Platform) y el AWS D1.1 (Structural Welding Code Steel) .Los pilotes cumplen con las especificaciones de API 5L Specification for Line Pipe. Además se debe cumplir con los requerimientos de CDB (Structural Steel Specification y Pile Steel Specification). Los pilotes serán soldados con la base inferior de las estructuras del muelle, en cuyo lugar se encuentra el material API 2H Grado 50.
- Los plazos de construcción (40 meses) hacen imprescindible la optimización de las tasas de metal depositado. Para alcanzar ello, la soldadura semiautomática y mecanizada deberán ser consideradas como las opciones más adecuadas.
- Para las uniones de espesores iguales con respaldo, se optimizará la capacidad productiva implementando el proceso SAW (arco sumergido) luego de ejecutar los primeros 2 pases con FCAW-G. Los primeros pases con un proceso semiautomático permitirán:
 - a. Poder corregir pequeños errores de alineamiento y preparación de juntas.
 - b. Aumentar el espesor de metal sobre el cual se depositará metal de soldadura con SAW. El proceso SAW utilizará valores de amperaje de alrededor de 600 A con alambre de 4.0 mm para poder mantener una tasa productiva alta. Por lo tanto se requerirá un espesor de metal suficiente que sirva como respaldo del primer pase hecho con SAW.

Figura 34 – Ciclo modificado de cortocircuito que describe el funcionamiento RMD.



Fuente: RMD Basics – Miller Electric Inc.

- El sistema RMD (Regulated metal deposition) viene siendo usado en diferentes proyectos alrededor del mundo para realizar pases de raíz de manera semiautomática. El RMD es una modificación controlada por software de la transferencia cortocircuito convencional. El ciclo de corriente presente en el RMD se muestra en la siguiente figura. Se aplicará en posición vertical descendente. Se obtendrán velocidades de avance en el rango de 10 pulg/min en la raíz, un valor que dobla las velocidades de otros procesos. Ver **figura 34 y 35**.

Figura 35 – Imágenes de la aplicación de RMD en un proyecto de pilotaje en Brasil.



Fuente: Bira Costa Millerwelds Brasil.

- Para la soldadura sin respaldo de espesores desiguales, se debe seleccionar un proceso semiautomático para la raíz. Se selecciona la alternativa RMD para el pase de raíz con alambre sólido seguido de 3 rellenos con el proceso FCAW-G. Posteriormente se aplicará SAW para completar la junta.
- La utilización de SAW permitirá reducir los tiempos de fabricación al máximo, ya que con alambre de 4.0 mm se pueden obtener tasas de deposición de hasta 10 kg/h con valores de corriente de 600 A. Los proyectos de construcción masiva siempre intentan implementar procesos mecanizados para incrementar la productividad. El proceso SAW para esta aplicación requerirá la implementación de un sistema de rodillos viradores (turning rolls) que exigirán una inversión de \$ 60 000. Sin embargo las tasas de producción obtenidas justificarán ampliamente la selección. Ver **figura 36**.

Figura 36 – SAW para el relleno y acabado girando sobre rodillos viradores “turning rolls” para el shop welding.



Fuente: Bira Costa Millerwelds Brasil.

Al implementar la solución descrita anteriormente el autor logro que se aprobaran los procedimientos propuestos por la ingeniería del proyecto en Saipem Francia y por el cliente PERU LNG. Se inició la instalación de equipamiento en Melchorita con miras a la calificación y construcción a empezar en mayo del 2007.

Se calificaron ambos procedimientos con resultados exitosos y su utilización se regulo con documentación de soldadura de uso mandatario en el proyecto.

9. CONCLUSIONES

- El proceso SMAW ha sido el más usado en la construcción de sistemas de transporte de hidrocarburos. La vasta experiencia y la continua aplicación de soldadores, hoy en día conducen al desarrollo de estudios que han permitido mejoras en los procedimientos, pudiendo evaluar los tipos de consumibles adecuados para evitar ambientes corrosivos, agrietamiento por fragilidad por hidrogeno, corrosión bajo tensión o fatiga en las juntas soldadas, así como el desarrollo de estudios para mantenimiento de oleoductos en servicio pudiendo modelar la carga calórica en la soldadura de mantenimiento previniendo fuertes gastos económicos por tiempos de parada y pérdidas humanas.
- Dada la necesidad de mejorar la eficiencia del proceso de soldadura SMAW, estudios comparativos con procesos semiautomáticos permiten ver que procedimientos combinados GMAW (para el primer pase) y FCAW – S (para los demás pases) son calificables satisfactoriamente, para llegar a este resultado es necesario el manejo apropiado de variables como el precalentamiento (75°C en proceso SMAW) y la selección de consumibles adecuados al grado de la tubería API 5L, este proceso semiautomático evidencian una mayor capacidad de absorción de energía dando como resultado juntas soldadas con mayor tenacidad.
- Se puede concluir que el proceso SMAW tiene mayor confiabilidad que el proceso GMAW en la soldadura de tuberías, ya que en los ensayos de radiografía y doblado las muestras correspondientes no presentaron ningún tipo de fallas. Esto se puede atribuir a la buena dilución que se obtuvo en las probetas donde se aplicó el proceso SMAW, numeral 8.2.5.
- Como se muestra en la parte final del estudio del numeral 8.2.5, el proceso de soldadura GMAW es un 52% más económico que el proceso de soldadura SMAW, ya que los costos de los materiales consumibles y su bajo rendimiento de los mismos elevan los costos generales para el proceso de soldadura SMAW.
- Procedimientos combinados con procesos semiautomáticos como GMAW (para el primer pase) y FCAW – S (para los demás pases) facilitan la construcción de sistemas de transporte de hidrocarburos con tubería API 5L – X70 en donde no es requerido precalentamiento en los pases, esto debido al menor contenido de hidrogeno difusible que tienen electrodos como el E91T8 – G.
- El proceso FCAW – S se ha venido mostrando como una alternativa para la mejora de eficiencia en la construcción de sistemas de transporte de hidrocarburos, por encima de el proceso GMAW que tiene una eficiencia mayor cercana al 100% (debido a que el electrodo es un alambre metal solido), sin embargo este ultimo presenta desventajas por los ambientes donde se aplica el proceso (zonas húmedas, atmosferas con vientos fuertes).
- En sistemas de transporte de hidrocarburos que manejen fluidos con ambientes corrosivos de H₂S (acido sulfhídrico) y que se construyan bajo el proceso FCAW – S, es recomendable realizar precalentamiento de 100 °C para evitar la formación de grietas inducidas por el hidrogeno.

- La implementación de nuevos procesos de soldadura en la construcción de sistemas de transporte de hidrocarburos se pueden dar siempre que se maneje una mezcla de soldadura en campo (field welding) con procesos semiautomáticos como el FCAW – S y soldadura en taller (shop welding) usando procesos como el GMAW y SAW para prefabricados que se puedan desarrollar, esta mezcla permite una alta eficiencia en la construcción de oleoductos y mejora la calidad de las juntas soldadas. Esta implementación está sujeta a la mente abierta de las empresas constructoras que evalúen este tipo de alternativas y quieran avanzar en el camino trazado por la competitividad internacional.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Air Products - INFRA. (s.f.). *Manual de conceptos basicos en soldadura y corte. SOLDADOR, soldadura y oxicorte con gas de proteccion.*
- API, A. P. (2008). *Specification 5L - Petroleum and natural gas industries - Steel pipe for pipeline transportation systems.*
- ASME, A. S. (2003). *Gas transmission and distribution piping systems.*
- ASME, A. S. (2006). *Pipeline transportation Systems for Liquid hydrocarbons and other liquids.*
- AWS, A. /. (1991). *Specification for carbon steel electrodes for Shielded Metal Arc Welding, Standard 5.1 - 91.* Miami Florida: American National Standards Institute / American Welding Society.
- Cary, H. (1996). *Modern Welding Technology 3th. edition.*
- Chu, W. H. (2004). *Automatizacion SMAW mediante control Fuzzy para controlador PID con ganancia programada.*
- Codega, D., & Zalazar, M. (2007). Evaluacion de la susceptibilidad a la fisuracion en frio en soldaduras multipasada. *Congreso SAM/CONAMET 2007*, (pág. 6). San Nicolas, Argentina.
- Coloma Vera, P. A. (2007). *Planificacion, construccion y reparacion de construcciones soldadas: analisis de tres casos.* Lima - Peru: Pontificia Universidad Catolica del Peru.
- Garcia, A. R. (1998). Consideraciones sobre Soldadura Manual con Electrodo Revestido. 7.
- Gonzalez, J. C., & Soriano, G. G. (2001). *Soldadura del acero API 5L - X52 mediante el proceso Flux Cored Arc Welding (FCAW) con transferencia pulsada.* Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela.
- Hilton, J., Fals, H., & Trevisan, R. (2009). Susceptibilidad a grietas inducidas por hidrogeno en ambiente corrosivo de H₂S de juntas soldadas de acero API 5L - X80. *Revista de Metalurgia*, 45 (4) , 267 - 276.
- INDURA S.A, I. y. (s.f.). *Manual de Sistemas y Materiales de Soldadura.*
- Masabanda, S. J., & Yauripoma, M. R. (2009). *Elaboracion de un manual para Prácticas de la materia Teoria de Procesos de Soldadura.* Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Norrish, J. (1992). *Advanced Welding Processes. New Manufacturing Processes and Materials Series.* Philadelphia, New York: IOP Publishing LTD.
- Ramirez, J. (2003). *Soldadura por Arco Manual con Electrodos Revestidos.* Universidad Central de Venezuela, Escuela de Ingenieria.

Ramos Morales, F., Duffus Scott, A., & Rodriguez Perez, M. (2009). Energia Calorífica necesaria, durante la Soldadura en servicio de tuberías para el transporte de Petróleo. *Soldagem Insp. São Paulo, Vol. 14.* , Pag. 047 - 057.

Rivadeneira Camino, A., & Serrano, O. (1996). *Estudio comparativo de los procesos de soldadura SMAW y GMAW en las uniones de tuberías de transporte de combustible.*

Rodríguez Paradinas, E., & Orozco Vallejo, E. (1967). El oleoducto Malaga-Puertollano Proyecto y Construcción de la Conducción Principal. *Revista de Obras Publicas* .

Tavara Aponte, S. A., & Barboza Rodríguez, J. F. (2001). *Influencia de los cordones de soldadura sobre la resistencia a la corrosión del acero API 5L X52, en agua sedimentada de crudo de petróleo.* Trujillo - Peru.

Zalazar, M., Ramini de Rissone, M., Surian, E., Bruna, R., & Baralla, E. (2009). Efecto del procedimiento de soldadura sobre las propiedades de uniones soldadas de aceros microaleados para cañería. *Soldagem Insp. São Paulo, Vol. 14* , 036 - 046.

Zalazar, M., Ramini de Rissone, N. M., & Surian, E. S. (2007). Analisis de la soldabilidad de Aceros de cañerías microaleados utilizando dos procesos de soldadura. *Congreso SAM/CONAMET*, (pág. 6). San Nicolas, Buenos Aires.

PAGINAS WEB

- Pagina web INDURA (<http://www.indura.cl>)
- Página web Lincoln Electric (<http://www.lincolnelectric.com>)
- Página web ACOSEND (<http://www.kairosgc.com/acosend/normas.php>)
- Página web de la AWS (<http://www.aws.org>)
- Páginas web de ECOPETROL:
(http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta_petrolera124/transporte.htm)
(http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta_petrolera124/transporte.htm)
(<http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta127/filiales.htm>)