

SOLDABILIDAD EN ACEROS INOXIDABLES Y ACEROS DISIMILES

RESUMEN

La necesidad de unir aceros disímiles mediante procesos de soldadura por arco eléctrico es una práctica muy poco común, pero que, en algunos casos, se hace necesario por la complejidad de algunos equipos y máquinas (como calderas recuperadoras de calor, turbinas, intercambiadores de calor, etc.) requeridos en la industria. Las uniones más usuales son entre aceros de baja aleación o no aleados, con aceros de alta aleación (como los aceros inoxidable austeníticos). Lo anterior requiere que se elijan cuidadosamente los procesos, los metales de aporte y los métodos de aplicación de las soldaduras para que esta quede lo más cercana posible a la naturaleza de los aceros a unir. Uno de los métodos que genera mejores resultados en este tipo de uniones, es la utilización del diagrama de Schaeffler ^[1]. Mediante el estudio y el manejo de este diagrama se puede predecir la estructura del metal de soldadura obtenido en la unión de aceros inoxidable disímiles, o de aceros inoxidable con aceros al carbono, con o sin aleación, partiendo del níquel equivalente tanto de los materiales base como de los materiales de aporte.

ABSTRACT

The necessity to unite dissimilar steel by means of processes of electrical arc welding is one practices very little common, but that, in some cases, it becomes by the complexity of equipment and machinery (like boilers, heat recovery steam generators, turbines, heat exchangers, etc) required in the industry necessary. The most usual unions are between not alloyed low alloy steels or, with steel of high alloy (like austenitic stainless steel). The previous thing requires that the processes, the metals of contribution and the methods of application of the welds are chosen carefully so that this is left but near the possible thing the nature of steel to unite. One of the methods that generate better results in this type of unions, is the use of the Schaeffler diagram ^[1]. By means of the study and the handling of this diagram the structure of the metal of weld can be predicted obtained in the stainless steel or dissimilar stainless steel union, with carbon steels, with or without alloy, starting off of material equivalent nickel as much of the base as of the contribution materials.

KEYWORDS: *Boilers, Heat recovery steam generator, Heat exchangers, Austenitic stainless steel.*

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen miles de metales diferentes que sirven como materiales de construcción; los diseñadores pueden escoger el metal que mejor se comporte de acuerdo a las necesidades particulares. Estos materiales difieren no solo en su composición sino también en la forma como han sido manufacturados; lo que los hace más o menos soldables creándose, la necesidad de evaluar a fondo las formas disponibles para su soldadura. En la fabricación de equipos y máquinas destinados a la transformación de energía, es cada vez más frecuente las aplicaciones de soldaduras en aceros disímiles. Esto lleva a que se tenga que investigar y ensayar cuidadosamente con el fin de descubrir las mejores condiciones bajo las cuales se deban efectuar dichas uniones.

Además de las recomendaciones que se encuentran en los catálogos de fabricantes de metales de aporte ^{[1], [4]}, que son muy funcionales cuando las soldaduras son entre materiales similares, es necesario hacer un mejor análisis cuando de materiales disímiles se trata y en especial de

aceros inoxidable. Para los aceros, este análisis parte del estudio e interpretación del diagrama de Schaeffler, con el cual, partiendo del níquel y el cromo equivalente del material base y de los materiales de aporte, es posible predecir la estructura del metal de soldadura depositado en una unión de aceros inoxidable disímiles, o de aceros inoxidable con aceros al carbono, con o sin aleación ^[1]. Es de anotar que para saber la composición química de un metal de aporte depositado, la mejor forma es acudir al catálogo de productos del fabricante, mientras que, para tener idea de la composición química de los materiales base, es necesario acudir a las normas o códigos que los clasifican (Ejemplo: SAE, AISI, ASTM, ASME).

2. TIPOS DE ACEROS

2.1 Aceros al Carbono

Los aceros al carbono son los más comúnmente utilizados, contienen principalmente hierro con unas

RICAUARTE OSPINA LOPEZ

Ingeniero Mecánico
Profesor Auxiliar
Universidad Tecnológica de Pereira
ricaospi@utp.edu.co

HECTOR AGUIRRE CORRALES

Ingeniero Mecánico
Profesor Auxiliar
Universidad Tecnológica de Pereira
hectorac@utp.edu.co

HERNANDO PARRA L

Ingeniero Mecánico
Profesor Asistente
Universidad Tecnológica de Pereira
heparra@utp.edu.co

pequeñas adiciones de carbono, manganeso, fósforo, azufre y silicio. La cantidad de carbono presente tiene un gran efecto sobre las propiedades del metal. La tabla 1 muestra algunos ejemplos de estos aceros y sus características ^[3].

Los aceros al carbono son aquellos en los cuales el carbono es el elemento de aleación que controla en forma esencial las propiedades de las aleaciones y en los cuales la cantidad de manganeso no puede exceder de 1.65% y los contenidos de cobre y silicio deben ser cada uno menores de 0.60%. Los aceros al carbono pueden subdividirse en los que contienen entre 0.08% y 0.35% de carbono, los que contienen entre 0.35% y 0.50% de carbono y los que contienen más de 0.50% de carbono. Estos se conocen respectivamente como aceros de bajo carbono, aceros de medio carbono y aceros de alto carbono ^[2].

Nombre común	%C	Usos	Soldabilidad
Acero de bajo carbono	0.15% máximo	Electrodos para soldadura, láminas y chapas	Excelente
Acero suave (mild steel)	0.15%-0.30%	Perfiles y barras estructurales laminados	buena
Acero de medio carbono	0.30%-0.50%	Partes de maquinaria	Poca (precalentar y postcalentar)
Acero de alto carbono	0.50%-1.00%	Resortes, troqueles, rieles de ferrocarril	Poca (Difícil soldar sino se precalienta y postcalienta adecuadamente)

Tabla 1. Tipos de aceros al carbono. ^[3].

2.2 Aceros de Baja Aleación

Los aceros de baja aleación contienen adiciones menores de otros elementos tales como níquel, cromo, manganeso, silicio, vanadio, columbio, aluminio molibdeno y boro. La presencia de estos elementos en pequeñas cantidades da como resultado una marcada diferencia en sus propiedades mecánicas. Estos aceros de baja aleación generalmente son clasificados como aceros estructurales de alta resistencia y baja aleación, aceros para maquinaria y partes para automotores, aceros para servicio a baja temperatura, o aceros para servicio a elevada temperatura. En la tabla 2 se muestran algunos casos de aceros al carbón y aleados ^[3].

Serie o designación	Tipos y clases
10XX	Aceros al carbón no resulturizados
11XX	Aceros al carbón resulturizados
13XX	Aceros al manganeso 1.75%

23XX	Aceros al níquel 3.5%
33XX	Níquel 3.5% cromo 1.55%
40XX	Acero al molibdeno 0.25%
46XX	Níquel 1.55% a 1.8% Molibdeno 0.20% a 0.25%
50XX	Cromo de 0.28% a 0.40%
87XX	Níquel 0.55%, cromo 0.50%, molibdeno 0.25%
98XX	Níquel 1.00%, cromo 0.80%, molibdeno 0.25%

Tabla 2. Designación numérica AISI-SAE de aceros al carbono y aleados. ^[3].

2.3 Aceros de Alta Aleación

A estos tipos de acero pertenecen esencialmente los aceros inoxidables y los aceros para herramientas.

Los aceros para herramientas contienen altas cantidades de carbono con algunas cantidades de otros elementos de aleación. Ellos exhiben alta dureza y son generalmente difíciles de soldar ^[3].

Los aceros inoxidables son simplemente aleaciones compuestas por hierro (Fe) y cromo (Cr). El hierro es el elemento fundamental de todos los aceros inoxidables. Sin embargo, para hacer que el hierro sea "inoxidable" el contenido de cromo en solución debe ser por lo menos de un 11.5%. Se adicionan otros elementos de aleación (Ni, Mo, Ti, Nb) con el fin de mejorar ciertas propiedades como son: ductibilidad, resistencia al impacto, resistencia al creep (deslizamiento o escurrimiento), resistencia a la corrosión, al calor, etc ^[1].

2.3.1 Tipos de Aceros Inoxidables

Los aceros inoxidables se dividen en cuatro grupos:

Austeníticos, Martensíticos, Ferríticos y los que se endurecen por precipitación. Estas clasificaciones se refieren principalmente a la estructura de los aceros. La estructura martensítica es dura y frágil, la ferrítica es blanda y dúctil, en cambio la austenítica es de alta resistencia a la tensión, al impacto y al mismo tiempo dúctil ^[3].

Los aceros inoxidables descansan principalmente en la presencia de cromo para lograr las cualidades de inoxidables. En general, mientras más alto sea el contenido de cromo, más resistente a la corrosión será el acero. Hay tres clases comunes de aceros inoxidables: austenítico, ferrítico y martensítico. Los nombres de estas clases reflejan la microestructura de la cual está compuesto en forma normal el acero. Los elementos de aleación en el acero pueden clasificarse como estabilizadores de austenita y estabilizadores de ferrita. Los estabilizadores de austenita de importancia son el carbono, níquel, nitrógeno y manganeso. Estos elementos mejoran la retención de la austenita conforme se enfría el acero. Cuando está presente 12% o más de manganeso, o cuando está presente 20% o más de níquel, es imposible enfriar el acero con la lentitud suficiente para permitir que la austenita se transforme en ferrita. Aun con

contenidos mucho más bajos de níquel y manganeso, la transformación es muy lenta y la austenita es estable a la temperatura ambiente. Los estabilizadores de ferrita de importancia son el cromo y los formadores fuertes de carburos. Los estabilizadores de ferrita tienden a evitar la transformación del acero en austenita bajo el calentamiento. El que un acero sea austenítico, ferrítico o martensítico depende del balance entre las cantidades presentes de estabilizadoras de austenita y ferrita y el ciclo de calentamiento-enfriamiento al cual se sujeta el acero ^[2].

2.3.1.1 Martensíticos

Estos aceros son magnéticos y contienen entre 11.5% a 18% de cromo, como su principal elemento de aleación. Algunos ejemplos de este grupo son los aceros martensíticos AISI 410, 416, 420, 431, 501, y 502.

En la soldadura de los aceros martensíticos se pueden producir tensiones y por consiguiente grietas, si no se adoptan las precauciones convenientes.

Siempre que sea posible debe emplearse como metal de aporte aleaciones austeníticas (como la AISI 309 y 310) para absorber las tensiones en las zonas cercanas al cordón y así evitar grietas.

Es conveniente precalentar entre 300 y 350°C las piezas a ser soldadas. Después de la soldadura y una vez enfriadas las piezas se recomienda un revenido de 600 a 700 °C.

La mejor resistencia a la corrosión para estos aceros se obtiene efectuando tratamientos térmicos de temple y revenido a las temperaturas recomendadas. La resistencia a la corrosión en estos aceros, no es tan buena como en los aceros austeníticos o los ferríticos.

Son utilizados principalmente, en piezas que van a estar sometidas a corrosión y que requieren de cierta resistencia mecánica. Algunos usos son: aletas para turbinas, rodetes de turbinas hidráulicas, fundiciones resistentes a la corrosión, cuchillería, piezas de válvula, etc ^[1].

2.3.1.2 Ferríticos

Loa aceros inoxidable ferríticos contienen entre 17% y 27% de cromo. Ejemplos de éstos son los aceros AISI 405, 430, 442 y 446.

Estos aceros no son endurecibles por tratamiento térmico sino sólo moderadamente mediante trabajo en frío. Son magnéticos al igual que los martensíticos. Pueden trabajarse en frío o en caliente, pero alcanzan su máxima ductilidad y resistencia a la corrosión en la condición de recocido.

En los aceros ferríticos con un alto contenido de cromo, puede aparecer fase sigma (dura y frágil) cuando se les mantiene por mucho tiempo a temperaturas cercanas a 470°C. Por otro lado los aceros ferríticos son muy propensos al crecimiento del grano. (850°C - 900°C), inconveniente para la soldadura. Si las piezas a soldar son de dimensiones considerables, se recomienda postcalentar las piezas entre 700°C y 800°C, seguido de un enfriamiento rápido.

Como los aceros ferríticos se pueden deformar fácilmente en frío, se utilizan mucho para estampados profundos de piezas, como recipientes para industrias químicas y alimenticias, y para adornos arquitectónicos o automotrices ^[1].

2.3.1.3 Austeníticos

Estos son los aceros inoxidable al cromo-níquel (tipo 3XX) y al cromo-níquel-manganeso (tipo 2XX). Son esencialmente no magnéticos en la condición de recocido y no endurecen por tratamiento térmico. El contenido total de níquel y cromo es de por lo menos 23%. Se pueden trabajar fácilmente en caliente o en frío. El trabajo en frío les desarrolla una amplia variedad de propiedades mecánicas y, en esta condición, el acero puede llegar a ser ligeramente magnético. Son muy resistentes al impacto y difíciles de maquinarse. Estos aceros tienen la mejor resistencia a altas temperaturas y resistencia a la formación de escamas de todos los demás aceros inoxidable. Su resistencia a la corrosión suele ser mejor que la de los aceros martensíticos o ferríticos.

El mayor inconveniente que presenta la soldadura de los aceros austeníticos es la precipitación de carburos que pueden producirse en las zonas cercanas al cordón de soldadura, quedando sensibilizados a la corrosión intergranular. Para evitar esta precipitación se deben soldar las piezas sin precalentamiento y con el menor aporte de calor posible. Otra posibilidad es emplear aceros austeníticos con porcentaje de carbono menor a 0.03% o aceros austeníticos estabilizados con titanio, niobio o tántalo ^[1].

3. SELECCIÓN DE METAL DE APORTE PARA UNIONES ENTRE ACEROS INOXIDABLES Y ENTRE ACEROS AL CARBÓN Y ACEROS INOXIDABLES.

Como una ley fundamental, el metal de aporte para una soldadura debe ser de igual o mayor aleación al metal base. Así, aceros al carbón pueden ser soldados con un metal de aporte inoxidable como por ejemplo tipo 316, mientras que, un acero inoxidable no puede ser soldado con un metal de aporte de acero al carbón como el tipo E60XX. Por lo anterior, veremos que para la soldadura entre un acero al carbón aleado o no aleado, y un acero inoxidable, se seleccionará siempre un metal de aporte cuyo depósito es un acero inoxidable.

3.1 Diagrama de Schaeffler

El diagrama de Schaeffler, figura 1 se usa principalmente para predecir la estructura del metal de soldadura obtenido en la unión de aceros inoxidable disímiles, o de aceros inoxidable con aceros al carbono, con o sin aleación. Este diagrama fue obtenido por Al Schaeffler de manera empírica y permite determinar la estructura de un metal conociendo su composición.

Este diagrama es válido únicamente cuando los elementos se encuentran en proporciones no mayores a:

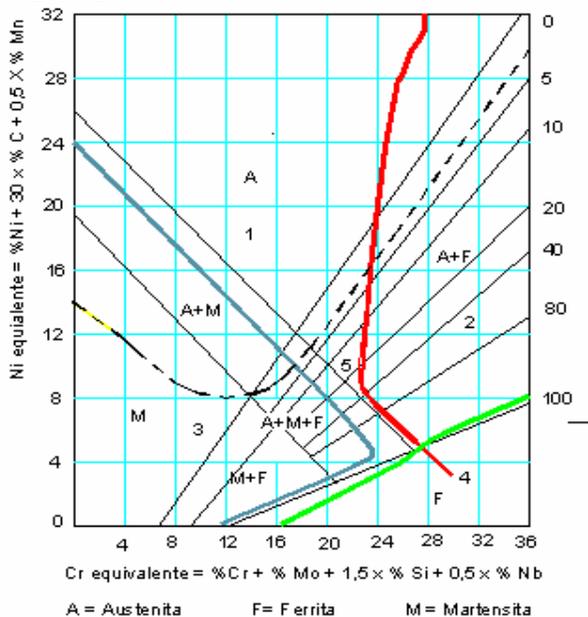
C máx. 0.2%, Mn máx. 1.0%, Si máx. 1.0%, Mo máx. 3.0%, Nb máx. 1.5%

Adicionalmente se indican problemas que presentan determinadas estructuras al soldar, dependiendo de su ubicación en el diagrama, que pueden evitarse al seleccionar adecuadamente el metal de aporte y el procedimiento de soldadura.

Para su empleo se parte del cromo y el níquel equivalente del material base y del material de aporte. Estos se calculan a partir de las fórmulas dadas a continuación, para luego graficarlas en el diagrama de Schaeffler (figura 3).

Cromo equivalente = $\%Cr + \%Mo + 1,5x\%Si + 0,5x\%Nb$ (1)

Níquel equivalente = $\%Ni + 30x\%C + 0,5x\%Mn$ (2)



- 1 - - - - FISURACION EN CALIENTE POR ENCIMA DE 1250 C
- 2 - - - - FRAGILIDAD POR FASE SIGMA ENTRE 500 Y 900 C
- 3 - - - - FISURACION POR TEMPLE POR DEBAJO DE 400 C
- 4 - - - - CRECIMIENTO DE GRANO POR ENCIMA DE 1150 C

Figura 1. Diagrama de Schaeffler. ^[1]

Cuando se trata de unir materiales de la misma composición química, el punto correspondiente al metal depositado se encontrará entre la recta trazada por los puntos correspondientes al metal base y al metal de aporte. Su ubicación específica dependerá del grado de dilución con que se trabaje. En el proceso de arco manual (SMAW) el valor típico es de 30%. La tabla 3 muestra algunos porcentajes de dilución por proceso de soldadura, obtenidos experimentalmente ^[5]. Es de anotar que los porcentajes de dilución varían con el amperaje utilizado, pero los promedios tabulados están dentro del rango de amperaje recomendado para cada aplicación ^[6].

PORCENTAJES DE DILUCION POR PROCESO		
Proceso	Gas de protección (%)	Dilución %
SMAW	Ninguno	30
GMAW	Ar:81+He:18+CO2:1	36.5
GMAW	Ar:98+O2 :2	42.8
GMAW	Ar:43+He:55+CO2:2	43.7
GMAW	Ar:98+CO2:2	39.7
GMAW	Ar:100	39.7
GMAW	Ar:98+O2 :2	44.1
GTAW	Ar:95+He:5	43.6

Tabla 3. Porcentajes de dilución en uniones soldadas

En el caso de materiales disímiles se grafican los puntos correspondientes al cromo y al níquel equivalente de ambos materiales base. Se obtiene el punto medio de la recta trazada entre ambos puntos (siempre y cuando los materiales participen en la misma proporción). Después se une este punto con el punto correspondiente al material de aporte. La composición del material depositado se encontrará dentro de esta recta y dependerá del porcentaje de dilución (30% para arco manual) ^[1].

Calificación de los Electrodo

En general todos los electrodos presentan un buen comportamiento, sin embargo, aunque todos se comportan de manera sobresaliente frente a los medios corrosivos, las diferencias se producen frente a la capacidad de absorber energía, esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo o su ductilidad.

Procedimiento de Soldadura

Aunque los parámetros utilizados en cada aplicación, son los adecuados para la soldadura de un material en particular, es recomendable, la realización de muestras con la variación de estos parámetros, lo cual permitirá obtener los valores óptimos.

Se pueden presentar en ciertas soldaduras una falta de fusión, pero para un soldador con experiencia esto es fácilmente detectable durante el proceso, y con la simple variación de la intensidad de corriente se puede corregir.

La utilización de un respaldo de cobre no presenta ningún beneficio adicional con respecto a las propiedades mecánicas, todo lo contrario, produce defectos en la soldadura que lo hacen innecesario usarlos.

Por lo anterior, los procesos de soldadura pueden ser utilizados en forma independiente, las diferencias encontradas entre algunos procesos permite seleccionar a priori los parámetros a utilizar para un resultado exitoso ^[7].

3.2 Ejemplo de Unión de Acero Aisi 410 con Metal de Aporte Austenítico.

Para el desarrollo de este ejemplo, los puntos correspondientes al cromo y níquel equivalentes del metal base y del metal de aporte están graficados en la figura 2.

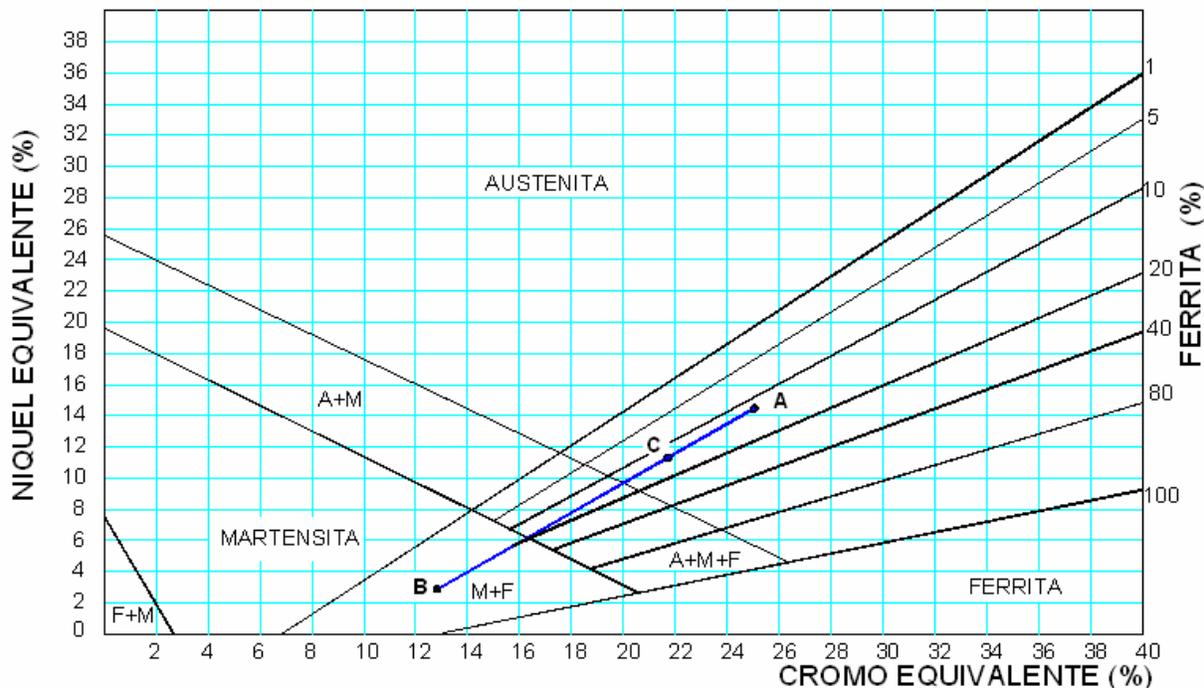


Figura 2. Ejemplo de unión de acero AISI 410 con metal de aporte austenítico

En este caso, se desea soldar un acero AISI 410 (cuya composición es: 13%Cr, 8.0%Mn, 0.5%Si, y 0.08%C) con un metal de aporte tipo 309L (cuya composición es: 24%Cr, 12.5%Ni, 1.8%Mn, 0.5%Si y 0.03%C) y suponemos una dilución del 30% (el metal base colabora con el 30% de la unión y el metal de aporte con el 70%).

¿Cuál es la composición del metal depositado (cordón) resultante?

Representamos la chapa 410 por el punto B (cromo equivalente de 13.75%, Níquel equivalente de 2.8%) y el metal base 309L por el punto A (cromo equivalente de 24.75%, Níquel equivalente de 14.3%). Cualquier metal que resulte de la mezcla A y B estará en la recta que los une. Dado que hemos supuesto que la dilución es del 30%, el punto C (que se obtiene al aplicar el 30% al segmento AB, medido desde A, o el 70%, al mismo segmento, medido desde B, tal como se muestra en la figura 2) será el resultante del cordón depositado y tendrá un 13% de ferrita. Por tanto es posible esta soldadura sin peligro de fisuración en caliente ^[1].

3.3 Ejemplo de Soldadura Disimil

En este caso, los puntos correspondientes al cromo y níquel equivalentes tanto del metal base como del metal de aporte, están graficados en la figura 3.

Supongamos que debemos soldar un acero SAE 1045 (de composición: 0.45%C, 0.8%Mn) con un acero AISI 316 (de composición: 18.7%Cr, 12%Ni, 2.0%Mn, 0.5%Si y 0.07%C) empleando un metal de aporte tipo 312-16 (de

composición: 28%Cr, 9.2%Ni, 2%Mn, 0.7%Si y 0.12%C).

¿Cuál es la composición del metal depositado (cordón) resultante?

En el caso de los aceros al carbono debe considerarse un 50% de descarburación al soldar, por lo que en la fórmula del níquel equivalente debe reemplazarse el coeficiente correspondiente al carbono por el valor $15x\%C$. De esta forma tenemos que para el acero SAE 1045 el cromo equivalente es igual a cero (0%), y el níquel equivalente igual a 7.15%, punto D. En el caso de la chapa AISI 316 tenemos cromo equivalente de 21.8% y níquel equivalente de 13.9%, punto B. Para el metal de aporte tipo 312-16, el cromo equivalente es de 28% y el níquel equivalente de 13.8%, punto A. Suponemos que ambas chapas (SAE 1045 y AISI 316) participan por igual en la soldadura y que la dilución es del 30%. El punto E es el resultante de ambas chapas y corresponde al punto medio del segmento DB (ambas chapas participan por igual en la soldadura) y el punto F resultante de aplicar el 30% de dilución al segmento AE (se obtiene al aplicar el 30% al segmento AE, medido desde A, o el 70%, al mismo segmento, medido desde E, tal como se muestra en la figura 3) el. Por lo tanto, el cordón resultante tendrá un 10% de ferrita y también es posible esta soldadura sin peligro de fisuración en caliente ^[1].

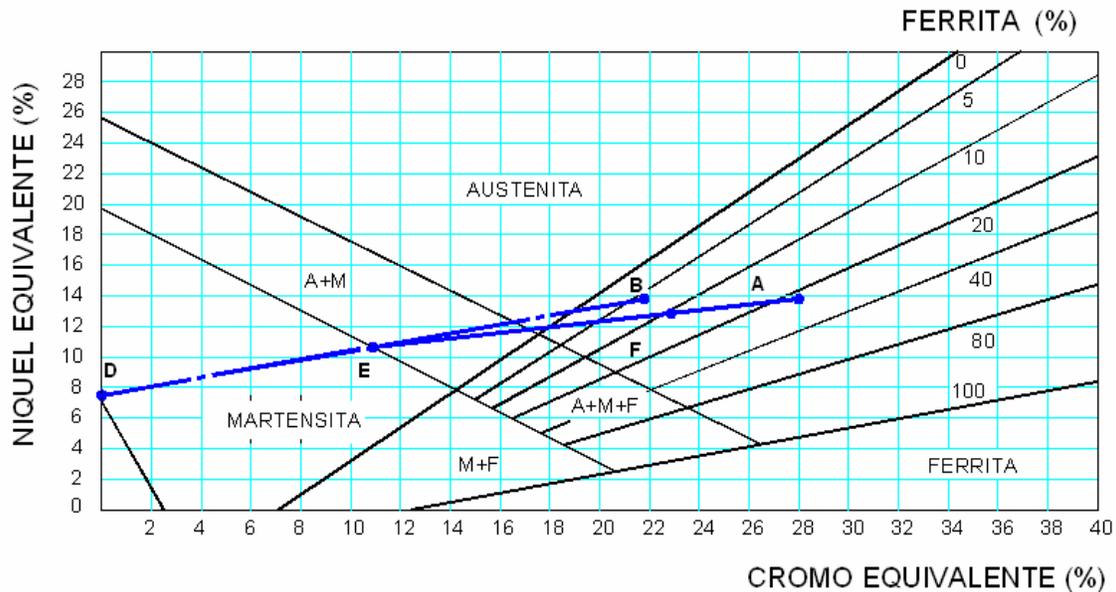


Figura 3. Ejemplo de unión disímil entre un acero SAE 1045 y un acero AISI 316 con metal de aporte tipo 312-16

4. CONCLUSIONES

En la soldadura de aceros inoxidable debe tenerse especial cuidado para que, ni la estructura ni la composición del cordón de soldadura y de la zona afectada por el calor, cambien sustancialmente.

En el diseño de una unión soldada entre acero inoxidable y aceros al carbón o entre aceros inoxidables similares, deben tenerse en cuenta las recomendaciones y los métodos existentes para que dicha unión ofrezca la mejor ductilidad y resistencia posibles. Si se siguen los pasos recomendados en este artículo y se usa el diagrama de Scheffler, los resultados serán los mejores.

El diagrama de Scheffler fue obtenido por Al Schaeffler de manera empírica y permite determinar la estructura de un metal conociendo su composición química y empleando las expresiones del cromo y del níquel equivalentes. Adicionalmente, el diagrama indica problemas que presentan determinadas estructuras al soldar dependiendo de su ubicación en el diagrama, que pueden evitarse al seleccionar adecuadamente el metal de aporte y el procedimiento de soldadura.

Actualmente, los fabricantes de electrodos y metales de aporte poseen una amplia gama de productos, lo cual nos brinda la posibilidad de obtener soldaduras cada vez mejor diseñadas.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] INDURA S.A. Sistemas y Materiales de Soldadura, 132 páginas, Chile, 1998.
- [2] DOYLE, Lawrence E. y otros. Procesos y Materiales de Manufactura para Ingenieros, Tercera edición, 1042 páginas, Prentice Hall, México, 1988.
- [3] ELECTROMANUFACTURAS S.A. Tecnología de Inspección de Soldadura, 565 páginas, Colombia, 1999.
- [4] ELECTROMANUFACTURAS S.A. Catálogo de Electrodo, 156 páginas, Colombia, 1999.
- [5] J. Lozano, P. Moreda, C.L. Llorente y P.D. Bilmes. Características de Fusión de Soldaduras GMAW de Aceros Inoxidables Austeníticos. Jornadas SAM 2000 – IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga, Agosto de 2000, 171 – 178.
- [6] MONSALBE G, Héctor y otros. Efecto del Amperaje en las Propiedades de Recubrimientos Duros Resistentes a la Abrasión Aplicados por Soldadura. Dyna, Año 71, Nro 144, pp. 151-163. Medellín, Noviembre de 2004. ISSN 0012-7353.
- [7] CORTEZ P, Ramón y otros. Estudio de la Soldabilidad y Corrosión del Acero Inoxidable AISI 904L con los Agentes Utilizados en la Lixiviación del Cobre. Revista Facultad de Ingeniería, U.T.A. Chile, Vol 12, No 2, 2004, pp. 43-56