



Manual ACEROS INOXIDABLES

INDURA[®]
Tecnología a su Servicio

Sistemas Electrodo y Consumibles para Aceros Inoxidable.

Sistema Electrodo y Consumibles para Acero Inoxidable

©INDURA S.A., Industria y Comercio
Inscripción en el Registro de Propiedad Intelectual N°188546

Reservados todos los derechos.
Prohibida la reproducción de la presente obra,
en su totalidad o parcialmente,
sin autorización escrita de INDURA S.A.

Texto elaborado por:
Mauricio Ibarra Echeverría, Eduardo Núñez Solís y José Miguel Huerta Ibáñez,
Gerencia de Desarrollo Tecnológico y SHEQ.

Colaboradores:
Judyth Sánchez Sánchez, Gerencia de Marketing y Gestión Comercial
Héctor Fritz Guinez, Gerencia Comercial

Otras obras editadas por INDURA:
“Manual para la recuperación y protección antidesgaste de piezas”
“Manual Sistemas y Materiales de Soldadura”
“Manual de Gases INDURA”
“Catálogo de Procesos y Productos”

Impresión de este libro:
Marzo 2010
2M Impresores Ltda.

INDURA S.A.
Av. Las Americas 585, Cerrillos, Chile

www.indura.net

Integrante de las siguientes asociaciones internacionales:
A.W.S. : American Welding Society
C.G.A. : Compressed Gas Association
I.O.M.A. : International Oxygen Manufacturers Association

En Chile, miembro integrante de:

ACHS : Asociación Chilena de Seguridad
ASIMET : Asociación de Industriales Metalúrgicos
ICARE : Instituto de Administración Racional de Empresas
ICHA : Instituto Chileno del Acero
SOFOFA: Sociedad de Fomento Fabril

Nota: INDURA, investiga e innova en forma permanente sus productos de acuerdo a las últimas tecnologías que se van desarrollando a nivel mundial. Por lo tanto las características de los productos aquí descritos pueden variar durante la vigencia de este libro.

ÍNDICE GENERAL

Temas generales de soldadura

Introducción	3
Seguridad en soldadura al arco	5
Seguridad al usar una máquina soldadora	7
Posiciones en soldadura	10
Esquemas básicos	11
Simbología en soldadura	12

Guía para soldadura de Acero Inoxidable

Aceros Inoxidables

Ventajas del Acero Inoxidable	14
Principales elementos de aleación y su influencia	14
Ferrita, Austenita, Martensita, Cementita, Perlita y Soluciones Sólidas	15
Diagrama Cromo-Hierro	17
Clasificación de acuerdo a su microestructura	18
Aceros Inoxidables Ferríticos	19
Aceros Inoxidables Martensíticos	20
Aceros Inoxidables Endurecibles por Precipitación	21
Aceros Inoxidables Dúplex	21

Corrosión	21
Corrosión Generalizada	21
Corrosión Intergranular	21
Corrosión por Picaduras (Pitting)	23
Corrosión Galvánica	23
Corrosión Bajo Tensión (Stress Corrosión Cracking, SCC)	23
Corrosión por Grietas (Crevice)	23
Corrosión Marina	24

Aceros Inoxidables a Bajas Temperaturas	24
Aceros Inoxidables a Altas Temperaturas Resistencia a la Oxidación (Scaling)	25
Selección de Electrodo para Aceros Inoxidables	26
Importancia del contenido de Ferrita	26
Medición y estimación del contenido de Ferrita	27
Diagrama de Schaeffler	28
Diagrama DeLong	29
Soldadura de Aceros Inoxidables	32

Soldadura de Aceros Inoxidables Austeníticos

Fenómeno a considerar en la soldadura de Aceros Inoxidables Austeníticos	37
Recomendaciones Prácticas en Soldadura de Aceros Inoxidables Austeníticos	40
Soldadura de Aceros Inoxidables Ferríticos	41
Fenómenos a Considerar en la Soldadura de Aceros Inoxidables Ferríticos	41
Recomendaciones Prácticas en la Soldadura de Aceros Inoxidables Ferríticos	42
Soldadura de Aceros Inoxidables Martensíticos	43
Recomendaciones Prácticas en la Soldadura de Aceros Inoxidables Martensíticos	43
Resistencia a la Tensión V/S Ductilidad	45
Soldadura de reparación de Piezas de Gran Sección	45

Electrodos

Arco Manual

• INDURA 308/308H	47
• INDURA 308 L	47
• INDURA 309 L	48
• INDURA 309 MoL	48
• INDURA 25-20	49
• INDURA 29-9S	49
• INDURA 316/316H	50
• INDURA 316L	50
• INDURA 347	51
• INDURA 13/4	51
• INDURA 2209	52

MIG	
• INDURA 308 L	52
• INDURA 309 L	53
• INDURA 316L	53
TUBULAR	
• INDURA 308 LT1	54
• INDURA 309 LT1	54
• INDURA 316 LT1	55
• INDURA 308 L-O	55
TIG	
• INDURA 308/308H	56
• INDURA 308 L	56
• INDURA 309 L	57
• INDURA 316 H	57
• INDURA 316 L	58
• INDURA 2209	58
Tablas	
Composición química de los Aceros Inoxidables.	59
Composición química Típica de Aceros Inoxidables (Material Base)	61
Dureza	
Tabla Comparativa de Dureza	63
Recomendaciones de electrodos de Acero Inoxidable de acuerdo al material base	65

INTRODUCCIÓN

Los objetivos del presente manual son:

- Revisar los fundamentos de la metalurgia del acero inoxidable.
- Proporcionar información sobre los electrodos y alambres de acero inoxidable INDURA.
- Entregar al usuario recomendaciones prácticas para la soldadura de los diferentes tipos de aceros inoxidables con electrodos INDURA.
- Proporcionar información de referencia para consulta.

La responsabilidad del fabricante de productos de soldadura es sugerir las composiciones de los electrodos o alambres, para metales base de acero inoxidable de acuerdo a información entregada por el cliente. Las recomendaciones prácticas entregadas para la soldadura de los diferentes tipos de aceros inoxidables son una guía y no pretenden reemplazar el procedimiento definido por los ingenieros de diseño o de materiales y tampoco garantiza la calificación de los soldadores, por lo tanto el fabricante no asume la responsabilidad por el rendimiento de las piezas soldadas con sus productos.

Los electrodos INDURA son fabricados y suministrados bajo un estricto sistema de calidad que cumple los requisitos de la norma ISO 9001 y de las normas AWS. Debido a que INDURA S. A está mejorando constantemente sus productos, se reserva el derecho de cambiar el diseño y/o las especificaciones sin aviso previo. La información contenida en las fichas técnicas, se presentan solamente como valores “típicos”. Los datos “típicos” son obtenidos cuando están soldados y probados de acuerdo con la especificación de la AWS. Otras pruebas y procedimientos pueden producir diversos resultados.

RESEÑA HISTÓRICA

Presente desde 1948, INDURA desarrolla e implementa soluciones tecnológicas integrales con gases y soldadura para optimizar los procesos productivos de las empresas de diversos mercados, contribuyendo así con su crecimiento y rentabilidad.

La compañía nace para satisfacer las necesidades del sector metalmeccánico con una moderna planta de electrodos. Ya en 1962 es la puesta en marcha de la primera Planta de Gases de aire, para la producción de oxígeno, acetileno y nitrógeno. Luego de esto, INDURA comenzó a expandirse fuera del territorio nacional.

En 1979 se inicio la internalización de la compañía a través de la fabricación de soldaduras en Ecuador. Luego ingresa en 1991, al mercado argentino comercializando soldaduras, gases y equipos que satisfacen las necesidades de los mercados de salud y metalmeccánica y resonancia magnética nuclear. 5 años más tarde, se extiende hasta Perú, principalmente en las áreas de minería, metalmeccánica y salud. El año 2005 fue la entrada con operaciones directas, al mercado Mexicano. Durante el 2008, la compañía adquiere la segunda empresa colombiana de gases, Cryogas y comienza sus operaciones en dicho país.

Además, la Compañía se ha consolidado a nivel internacional, contando con un efectivo canal de distribución que está presente en Estados Unidos, Canadá, Centroamérica, Uruguay, Venezuela y Bolivia.

En el sector metalmeccánico, INDURA ha desarrollado soluciones tecnológicas con gases y mezclas gaseosas para los procesos en los cuales los clientes lo requieran, cumpliendo con los más altos estándares internacionales, acreditando así un servicio de excelencia para cada requerimiento.

La experiencia de estos 60 años en el área metalmeccánica, le ha permitido a INDURA convertirse en un socio estratégico que ofrece a sus clientes una gama extensa de productos y servicios, los que contribuyen en cada aplicación y en cada industria, como por ejemplo en minería, astilleros, maestranzas, construcción, entre otros.

Certificaciones y Acreditaciones

INDURA y sus empresas relacionadas cuentan con las siguientes Certificaciones y Acreditaciones:

Sistema de Gestión de Calidad de INDURA S.A.

Aprobado por Lloyd's Register of Shipping Quality Assurance de acuerdo a Norma ISO 9001

Sistema de Análisis de Riesgos y Control de Puntos Críticos de INDURA S.A.

Aprobado por Lloyd's Register of Shipping Quality Assurance.

De acuerdo con Codex Alimentarius Annex to CAC/RCP1-1969, Rev.4 (2003)

Sistema de Gestión Medioambiental de SOLDADURAS CONTINUAS LTDA.

Aprobado por Lloyd's Register of Shipping Quality Assurance.

De acuerdo a Norma ISO 14001 / NCh-ISO 14001 of. 97

Laboratorio de Ensayos Químicos del CENTRO TÉCNICO INDURA LTDA.

Aprobado por el Instituto Nacional de Normalización, INN, Según NCh-ISO 17025 of. 2001

Laboratorio de Ensayos no Destructivos del CENTRO TÉCNICO INDURA LTDA.

Aprobado por el Instituto Nacional de Normalización, INN, Según NCh-ISO 17025 of. 2001

Laboratorio de Ensayos Mecánicos del CENTRO TÉCNICO INDURA LTDA.

Aprobado por el Instituto Nacional de Normalización, INN, Según NCh-ISO 17025 of. 2001

Sistema de Gestión del CENTRO TÉCNICO INDURA LTDA.

Aprobado por BVQI

De acuerdo a Norma ISO 9001 / NCh ISO 9001 of. 2001

Sistema de Gestión del CENTRO TÉCNICO INDURA LTDA.

Aprobado por BVQI

De acuerdo a NCh 2728 of. 2003

Sistema de Gestión del CENTRO TÉCNICO INDURA LTDA.

Aprobado por BVQI

De acuerdo a BS EN ISO 9001

Ventajas de preferir productos y servicios INDURA

Elegir la línea de productos y servicios INDURA presenta ventajas en Productividad, Calidad, Seguridad y Medio Ambiente para nuestros clientes, dichas ventajas se sustentan en:

Cumplimiento de normas internacionales y nacionales:

Adicionalmente a las acreditaciones detalladas anteriormente, INDURA cumple con las Normas AWS, además de ser auditado periódicamente por organismos certificadores como la American Bureau of Shipping (ABS), Lloyd's Register of Shipping (LRS), Germanischer Lloyd (GL), Nippon Kaiji Kyokai (NKK) y Canadian Welding Bureau (CWB).

Cobertura nacional e internacional:

INDURA posee cobertura nacional e internacional dada por una amplia red de plantas productivas, sucursales y distribuidores.

Asesoría técnica

INDURA ofrece a sus clientes asesoría en terreno, en sus sucursales de venta y a través de su Call Center.

Centros de formación técnica CETI:

INDURA ofrece a través de su Centro Técnico CETI variados servicios como: capacitación, calificación de procedimientos, calificación de soldadores, inspección, laboratorio de ensayos no destructivos, laboratorio mecánico y laboratorio químico.

Variedad de productos para amplia gama de aplicaciones:

INDURA ofrece una amplia variedad de productos en soldadura, gases y equipos para una amplia gama de aplicaciones.

SEGURIDAD EN SOLDADURA AL ARCO

Cuando se realiza una soldadura al arco, durante la cual ciertas partes conductoras de energía eléctrica están al descubierto, el operador tiene que observar con especial cuidado las reglas de seguridad, a fin de contar con la máxima protección personal y también proteger a las otras personas que trabajan a su alrededor.

En la mayor parte de los casos, la seguridad es una cuestión de sentido común. Los accidentes pueden evitarse si se cumplen las siguientes reglas:

Protección personal

Siempre utilice todo el equipo de protección necesario para el tipo de soldadura a realizar. El equipo consiste en:

1. **Máscara de soldar**, protege los ojos, la cara, el cuello y debe estar provista de filtros inactínicos de acuerdo al proceso e intensidades de corriente empleadas.
2. **Guantes de cuero**, tipo mosquetero con costura interna, para proteger las manos y muñecas.
3. **Coletos o delantal de cuero**, para protegerse de salpicaduras y exposición a rayos ultravioletas del arco.
4. **Polainas y casaca de cuero**, cuando es necesario hacer soldadura en posiciones vertical y sobrecabeza, deben usarse estos aditamentos, para evitar las severas quemaduras que puedan ocasionar las salpicaduras del metal fundido.
5. **Zapatos de seguridad**, que cubran los tobillos para evitar el atrape de salpicaduras.
6. **Gorro**, protege el cabello y el cuero cabelludo, especialmente cuando se hace soldadura en posiciones.

IMPORTANTE:

Evite tener en los bolsillos todo material inflamable como fósforos, encendedores o papel celofán.

No use ropa de material sintético, use ropa de algodón.

INDURA; como empresa miembro de AWS (www.aws.org) se suscribe a las normativas de seguridad de este organismo.

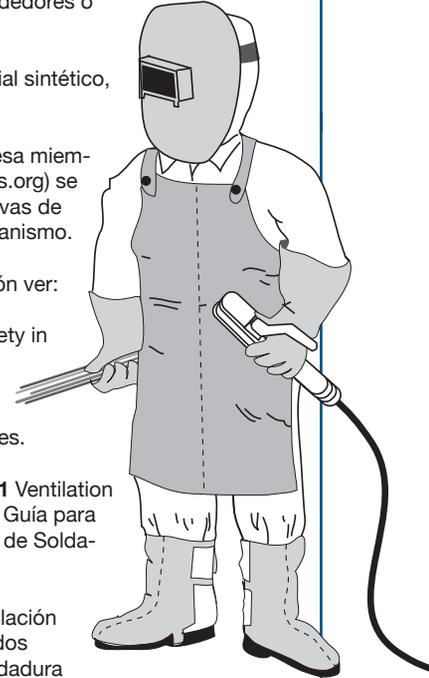
Para mayor información ver:

AWS Z49.1: 2005 Safety in Welding, Cutting, and Allied Processes; Seguridad en Soldadura Corte y Procesos Afines.

AWS F3.2M/F3.2: 2001 Ventilation Guide for Weld Fume; Guía para Ventilación de Humos de Soldadura.

Cada país posee legislación y reglamentos asociados a los procesos de Soldadura y Corte.

Consulte las normativas asociadas a seguridad en Soldadura y procesos afines válidos para su país.

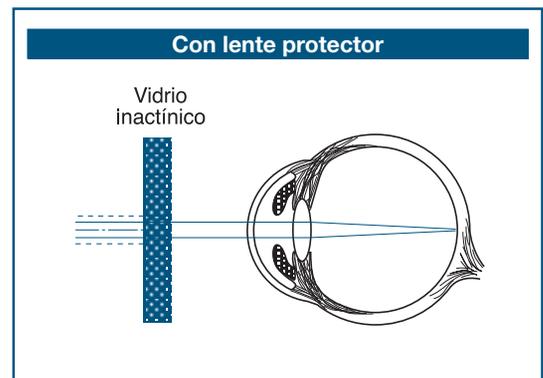
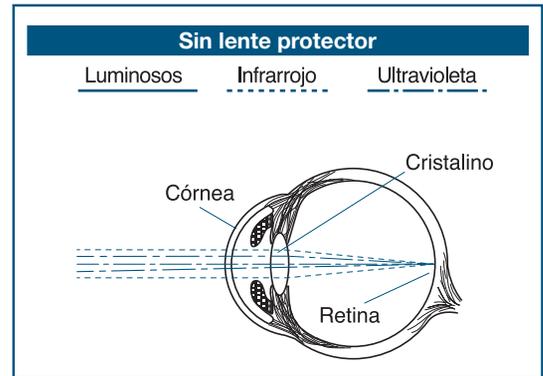


Protección de la vista

La protección de la vista es un asunto tan importante que merece consideración aparte. El arco eléctrico que se utiliza como fuente calórica y cuya temperatura alcanza sobre los 4.000°C, desprende radiaciones visibles y no visibles. Dentro de estas últimas, tenemos aquellas de efecto más nocivo como son los rayos ultravioleta e infrarrojo.

El tipo de quemadura que el arco produce en los ojos no es permanente, aunque sí es extremadamente dolorosa. Su efecto es como “tener arena caliente en los ojos”. Para evitarla, debe utilizarse un lente protector (vidrio inactínico) que ajuste bien y, delante de éste, para su protección, siempre hay que mantener una cubierta de vidrio transparente, la que debe ser sustituida inmediatamente en caso de deteriorarse. A fin de asegurar una completa protección, el lente protector debe poseer la densidad adecuada al proceso e intensidad de corriente utilizada. La siguiente tabla le ayudará a seleccionar el lente adecuado:

Influencia de los rayos sobre el ojo humano:



Escala de cristal inactínico a usar (en grados), de acuerdo al proceso de soldadura, torchado y corte

PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA O TÉCNICAS RELACIONADAS	INTENSIDADES DE LA CORRIENTE EN AMPERES																						
	0,5	1	2,5	5	10	15	20	30	40	60	80	100	125	150	175	200	225	250	275	300	350	400	450
Electrodos recubiertos											9	10	11			12			13			14	
MIG, sobre metales pesados											10		11	12			13			14			
MIG, sobre aleaciones ligeras											10	11	12	13		14		15					
TIG, sobre todos los metales y aleaciones					9	10	11		12		13	14											
MAG									10	11	12	13			14		15						
Torchado arco-aire											10		11	12	13	14	15						
Corte por chorro de plasma											11		12		13								
Soldadura por arco de microplasma	2,5	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		14			15						

Nota: Las áreas en azul corresponden a los rangos en donde la operación de soldadura no es normalmente usada. Según las condiciones de iluminación ambiental, pueden usarse un grado de protección inmediatamente superior o inferior al indicado en la tabla. La expresión metales pesados abarca los aceros y sus aleaciones, el cobre y sus aleaciones, etc.

SEGURIDAD AL USAR UNA MÁQUINA SOLDADORA

Antes de usar la máquina de soldar al arco debe guardarse ciertas precauciones, conocer su operación y manejo, como también los accesorios y herramientas adecuadas.

Para ejecutar el trabajo con facilidad y seguridad, deben observarse ciertas reglas muy simples:

Máquina soldadora (Fuente de poder)

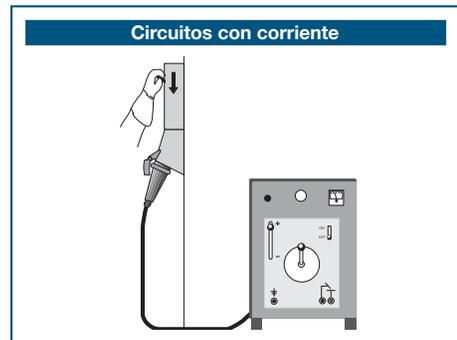
Recomendaciones para la instalación, operación y mantenimiento:

Siga las siguientes recomendaciones para la instalación de su equipo:

- Sólo personal calificado debe realizar la instalación eléctrica del equipo.
- No instale o ponga el equipo cerca o sobre superficies combustibles o atmósferas inflamables.
- No sobrecargue el cableado de su instalación eléctrica.
- Respete el ciclo de trabajo que requiere su equipo para permitir su periodo de enfriamiento.
- Recuerde que el periodo de trabajo continuo de su equipo depende del amperaje utilizado.
- Revise cuidadosamente el automático y el circuito de alimentación.
- Cubra los bornes de la máquina de soldar.
- Asegúrese que el cable de soldadura posea la sección y las características necesarias para conducir la corriente que se requiere, no utilice cables en mal estado o inadecuados.
- Desconecte la energía eléctrica cuando realice la conexión del enchufe del equipo a la fuente de energía.

Circuitos con corriente:

En la mayoría de los talleres el voltaje usado es 220 ó 380 volts. El operador debe tener en cuenta el hecho de que estos son voltajes altos, capaces de inferir graves lesiones. Por ello es muy importante que ningún trabajo se haga en los cables, interruptores, controles, etc., antes de haber comprobado que la máquina ha sido desconectada de la energía, abriendo el interruptor para desenergizar el circuito. Cualquier inspección en la máquina debe ser hecha cuando el circuito ha sido desenergizado.

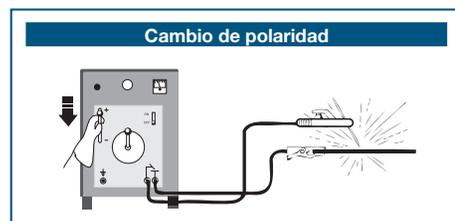


Línea a tierra:

Todo circuito eléctrico debe tener una línea a tierra para evitar que la posible formación de corrientes parásitas produzca un choque eléctrico al operador, cuando éste, por ejemplo, llegue a poner una mano en la carcasa de la máquina. **Nunca opere una máquina que no tenga su línea a tierra.**

Cambio de polaridad:

El cambio de polaridad se realiza para cambiar el polo del electrodo de positivo (polaridad invertida) a negativo (polaridad directa). No cambie el selector de polaridad si la máquina está operando, ya que al hacerlo saltará el arco eléctrico en los contactos del interruptor, destruyéndolos. Si su máquina soldadora no tiene selector de polaridad, cambie los terminales cuidando que ésta no esté energizada.



Cambio del rango de amperaje:

En las máquinas que tienen 2 o más escalas de amperaje no es recomendable efectuar cambios de rango cuando se está soldando, esto puede producir daños en las tarjetas de control, u otros componentes tales como tiristores, diodos, transistores, etc.

En máquinas tipo clavijeros no se debe cambiar el amperaje cuando el equipo está soldando ya que se producen serios daños en los contactos eléctricos, causados por la aparición de un arco eléctrico al interrumpir la corriente.

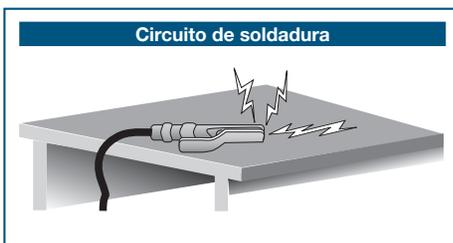
En máquinas tipo Shunt móvil, no es aconsejable regular el amperaje soldando, puesto que se puede dañar el mecanismo que mueve el Shunt.



Circuito de soldadura:

Cuando no está en uso el portaelectrodos, nunca debe ser dejado encima de la mesa o en contacto con cualquier otro objeto que tenga una línea directa a la superficie donde se suelda. El peligro en este caso es que el portaelectrodo, en contacto con el circuito a tierra, provoque en el transformador del equipo un corto circuito.

La soldadura no es una operación riesgosa si se respetan las medidas preventivas adecuadas. Esto requiere un conocimiento de las posibilidades de daño que pueden ocurrir en las operaciones de soldar y una precaución habitual de seguridad por el operador.



Seguridad en operaciones de soldadura

Condiciones ambientales que deben ser consideradas:

Riesgos de incendio:

En el lugar de trabajo pueden estar presentes atmósferas peligrosas. Siempre tenga presente que existe riesgo de incendio si se juntan los 3 componentes del triángulo del fuego (combustible, oxígeno y calor). Observe que basta que se genere calor, (ni siquiera es necesaria una chispa) y recuerde que existen sustancias con bajo punto de inflamación. Algunas recomendaciones prácticas para prevenir riesgos de incendio son las siguientes:

- Nunca se debe soldar en la proximidad de líquidos inflamables, gases, vapores, metales en polvo o polvos combustibles. Cuando el área de trabajo contiene gases, vapores o polvos, es necesario mantener perfectamente aireado y ventilado el lugar mientras se suelda.
- Antes de iniciar un trabajo de soldadura siempre identifique las potenciales fuentes generadoras de calor y recuerde que éste puede ser transmitido a las proximidades de materiales inflamables por conducción, radiación o chispa.
- Cuando las operaciones lo permiten, las estaciones de soldadura se deben separar mediante pantallas o protecciones incombustibles y contar con extracción forzada.
- Los equipos de soldar se deben inspeccionar periódicamente y la frecuencia de control se debe documentar para garantizar que estén en condiciones de operación segura. Cuando se considera que la operación no es confiable, el equipo debe ser reparado por personal calificado antes de su próximo uso o se debe retirar del servicio.
- Utilice equipo de protección personal. Disponga siempre de un extintor en las cercanías del área de trabajo.
- Las condiciones de trabajo pueden cambiar, realice test tan a menudo como sea necesario para identificar potenciales ambientes peligrosos.



Ventilación:

Soldar en áreas confinadas sin ventilación adecuada puede considerarse una operación arriesgada, porque al consumirse el oxígeno disponible, a la par con el calor de la soldadura y el humo restante, el operador queda expuesto a severas molestias y enfermedades.

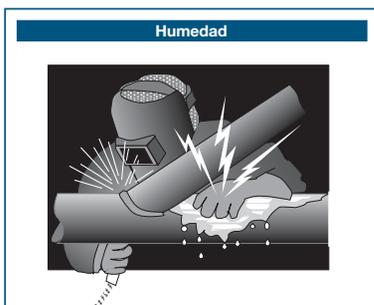


Humedad:

La humedad entre el cuerpo y algo electrificado forma una línea a tierra que puede conducir corriente al cuerpo del operador y producir un choque eléctrico.

El operador nunca debe estar sobre una poza o sobre suelo húmedo cuando suelda, como tampoco trabajar en un lugar húmedo.

Deberá conservar sus manos, vestimenta y lugar de trabajo continuamente secos.



Seguridad en soldadura de estanques

Soldar recipientes que hayan contenido materiales inflamables o combustibles es una operación de soldadura extremadamente peligrosa. A continuación se detallan recomendaciones que deben ser observadas en este tipo de trabajo:

a) Preparar el estanque para su lavado:

La limpieza de recipientes que hayan contenido combustibles debe ser efectuada sólo por personal experimentado y bajo directa supervisión.

No deben emplearse hidrocarburos clorados (tales como tricloroetileno y tetracloruro de carbono), debido a que se descomponen por calor o radiación de la soldadura, para formar fosfógeno, gas altamente venenoso.

b) Métodos de lavado:

La elección del método de limpieza depende generalmente de la sustancia contenida. Existen tres métodos: agua, solución química caliente y vapor.

c) Preparar el estanque para la operación de soldadura:

Al respecto existen dos tratamientos:

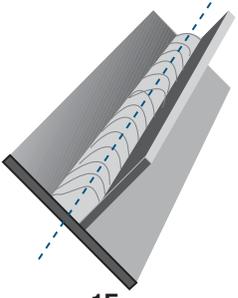
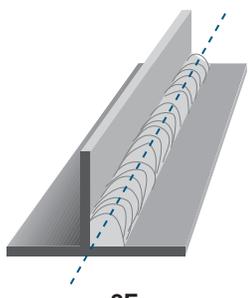
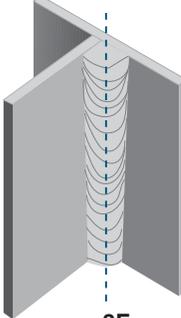
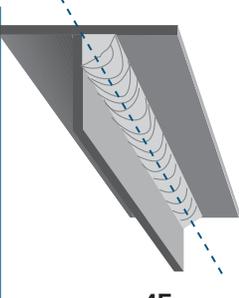
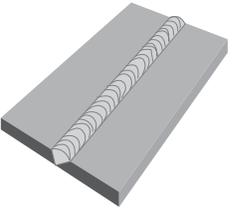
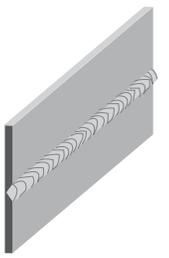
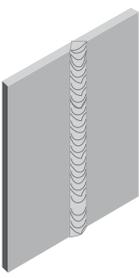
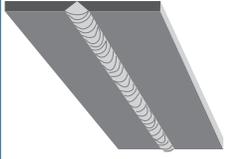
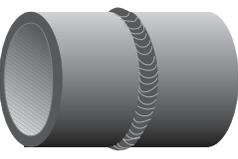
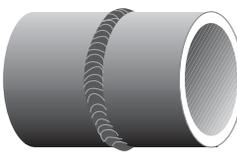
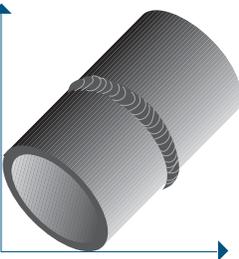
- Agua
- Gas CO₂ o N₂

El proceso consiste en llenar el estanque a soldar con alguno de estos fluidos, de tal forma que los gases inflamables sean desplazados desde el interior.



POSICIONES EN SOLDADURA

Designación de acuerdo con ANSI/AWS A3.0:2001

Plano	Horizontal	Vertical	Sobrecabeza
Soldadura filete			
 1F	 2F	 3F	 4F
Soldadura de ranura en plancha			
 1G	 2G	 3G	 4G
Soldadura de ranura en tuberías			
<p>La tubería se rota mientras se suelda</p>  1G	 2G	<p>La tubería no se rota mientras se suelda</p>  5G	 6G

ESQUEMAS BÁSICOS

Esquemas Básicos de Soldadura

Tipos de unión

A tope

Borde

Esquina

Tipo T

Traslape

Tipos de soldadura

Filete

Recubrimiento

Relleno

Ranura

Tapón

Formas de bisel

Cuadrado

Tipo J

Bisel simple

Bisel V doble

Bisel en V simple

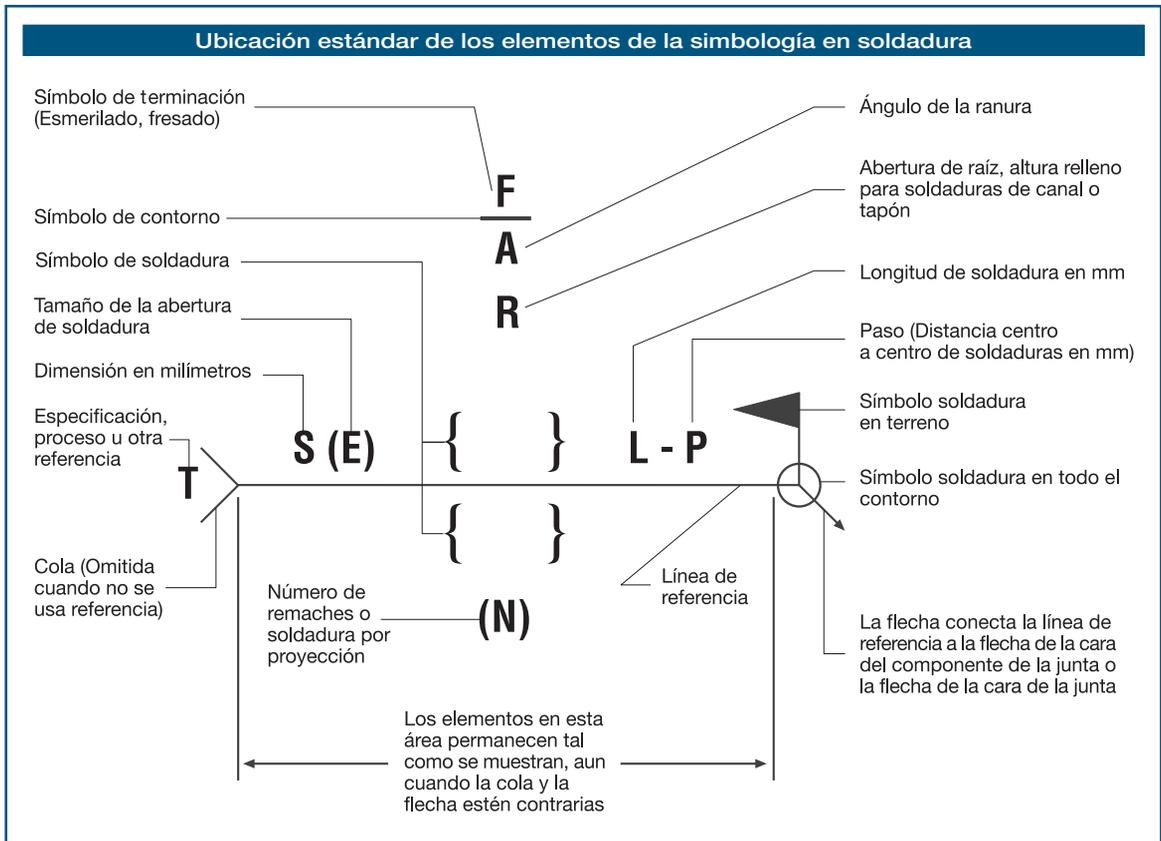
Doble Bisel simple

Tipo U

SIMBOLOGÍA EN SOLDADURA

La simbología en la especificación de trabajos de soldadura es una forma clara, precisa y ordenada de entregar información de operación. Existe para ello una simbología estándar que ha sido adoptada para la mayoría de los procesos de soldadura.

A continuación se muestra los diferentes significados que existen en una simbología de soldadura.



ACEROS INOXIDABLES

Origen del Acero Inoxidable

Existen muchas versiones diferentes sobre el origen del acero inoxidable. Una de ellas afirma que poco antes de la Primera Guerra Mundial, un comerciante francés en chatarra se dio cuenta que un cañón permanecía brillante y limpio entre un montón de oxidados cañones. Las investigaciones revelaron que se había agregado una cantidad excesiva de cromo al acero básico durante la fabricación de este cañón especial. Así, el acero inoxidable, habría sido descubierto por casualidad.

En 1905-1906 Quillet (Francia) fue la primera persona en producir y explorar, metalúrgica y mecánicamente, los aceros inoxidables en las composiciones que entran en las tres clases principales: Austeníticos, Ferríticos y Martensíticos. Sin embargo, él no descubrió el fenómeno de la pasividad (la resistencia sobresaliente de los aceros inoxidables a las soluciones químicas más corrosivas que atacarían fácilmente a los aceros al carbono).

Entre 1908-1910 la investigación de Monnartz (Alemania) dio a conocer la inoxidabilidad de estos aceros como función de la pasividad. Él notó la importancia del mínimo de aproximadamente 11% de cromo, la necesidad de bajo carbono, el hecho de que el carbono podía estabilizarse y la contribución del molibdeno para realizar la resistencia a la corrosión.

En la actualidad el Instituto Americano del Hierro (AISI) enumera aproximadamente 60 tipos convencionales. En los años recientes los aceros inoxidables para endurecimiento por precipitación (PH) han emergido como la cuarta clase. Más recientemente, los aceros inoxidables dúplex, que contienen aproximadamente 50% de Ferrita y 50% de Austenita están siendo promovidos como para ambientes agresivos en donde la resistencia a la corrosión por tensiones es de gran importancia.

Qué es el Acero Inoxidable

Los aceros inoxidables son aleaciones a base de hierro, con bajo contenido de carbono y un mínimo de 11% de cromo. La mayoría de los grados comerciales contiene al menos 11% de cromo y hasta 0.8% de carbono. Algunos grados contienen níquel como segundo elemento de aleación. Cuando el contenido total de la aleación excede aproximadamente el 50%, la designación "resistente al calor" es más aplicable que inoxidable.

Su principal característica es su alta resistencia a la corrosión. Esta resistencia es debido a la formación

espontánea de una capa de óxido de cromo en la superficie del acero. Aunque es extremadamente fina, esta película invisible está firmemente adherida al metal y es extremadamente protectora en una amplia gama de medios corrosivos. Dicha película es rápidamente restaurada en presencia del oxígeno, y así daños por abrasión, corte o mecanizados son reparados rápidamente (ver Fig.1 , 2 y 3).

Para aumentar la resistencia a la corrosión o para requerimientos de fabricación específicos, el cromo puede aumentarse y pueden añadirse otros elementos tales como níquel o molibdeno. Con aproximadamente 11% de Cromo, se formará una película protectora suficiente para soportar un ambiente poco agresivo como puede ser el interior de una vivienda, pero con el tiempo, si este acero presta servicio a la intemperie, acabará corroyéndose. Con alrededor de 18% de Cromo, el acero esta en condiciones de soportar las mas rigurosas condiciones atmosféricas. El grado de impenetrabilidad de la capa de óxido en ciertos ambientes depende no sólo de la composición de la aleación, sino también en el medio específico, de la temperatura de éste, y de la concentración del agente corrosivo.

Figura 1. El acero inoxidable forma una capa de óxido de cromo.

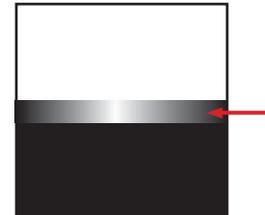


Figura 2. Cuando es rayado, esta película protectora es removida.

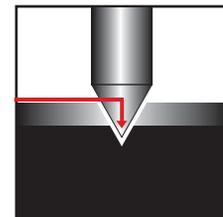
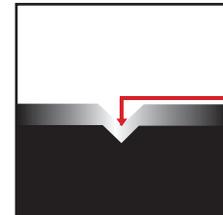


Figura 3. La capa protectora es restaurada.



VENTAJAS DEL ACERO INOXIDABLE

Resistencia a la corrosión

Todos los aceros inoxidable tienen una alta resistencia a la corrosión. Los grados de baja aleación, resisten la corrosión en condiciones atmosféricas; los grados altamente aleados pueden resistir la corrosión en la mayoría de los medios ácidos, incluso a elevadas temperaturas.

Resistencia a la alta y baja temperatura

Algunos grados resisten grandes variaciones térmicas y mantendrán alta resistencia a temperaturas muy altas, otros demuestran dureza excepcional a temperaturas criogénicas.

Facilidad para la fabricación

La mayoría de aceros inoxidable pueden ser cortados, soldados, forjados y mecanizados con resultados satisfactorios.

Resistencia mecánica

La característica de endurecimiento por trabajo en frío de muchos aceros inoxidable, se usa en el diseño para reducir espesores y así, los costos. Otros aceros inoxidable pueden ser tratados térmicamente para hacer componentes de alta resistencia.

Estética

El acero inoxidable está disponible en muchas terminaciones superficiales. Se mantiene fácilmente dando por resultado una alta calidad.

Propiedades higiénicas.

La facilidad de limpieza del acero inoxidable lo hace la primera opción en hospitales, cocinas, e instalaciones alimenticias y farmacéuticas.

Ciclo de trabajo

El acero inoxidable es un material durable, y es la opción mas barata considerando el ciclo vital.

PRINCIPALES ELEMENTOS DE ALEACIÓN Y SU INFLUENCIA

Cromo

- Formador de Ferrita y Carburo.
- Principal responsable de la resistencia a la corrosión y de la formación de la película de óxido.
- No presenta aporte significativo en la resistencia a altas temperaturas y al creep.

Níquel

- Formador de Austenita.
- Mejora la resistencia general a la corrosión en líquidos no oxidantes.
- Mejora la tenacidad y la ductilidad.
- Reduce la conductividad del calor.
- Aumenta la resistencia eléctrica.
- Aumenta la resistencia a la fatiga.
- Aumenta la capacidad de ser soldado.
- Se añade a los grados con cromo para mejorar las propiedades mecánicas.

Molibdeno

- Formador de Ferrita y Carburo.
- Mejora la resistencia a temperaturas elevadas y al creep.
- Mejora la resistencia general a la corrosión en medios no oxidantes, y la resistencia a la corrosión por picadura en todos los medios.

FERRITA, AUSTENITA, MARTENSITA, CEMENTITA, PERLITA Y SOLUCIONES SÓLIDAS

Ferrita y Austenita

El hierro puro solidifica a 1536°C en una forma cristalina llamada Ferrita, la cual tiene una estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC), formada por un átomo en cada una de las ocho esquinas y un átomo en el centro (ver Fig. 4). Al enfriarse a 1392°C , la estructura se transforma a Austenita, la cual es una estructura cúbica centrada en las caras (FCC) formada por un átomo en cada una de las ocho esquinas y un átomo en cada cara (ver Fig.4). A 911°C la fase se transforma nuevamente en Ferrita, forma estable a temperatura ambiente (ver Fig.4). Aunque estructuralmente son iguales, la Ferrita a alta temperatura se denomina Ferrita delta (δ), mientras que la Ferrita a baja temperatura se conoce como Ferrita alpha (α). A su vez la estructura de Austenita se denomina por la letra gama (γ).

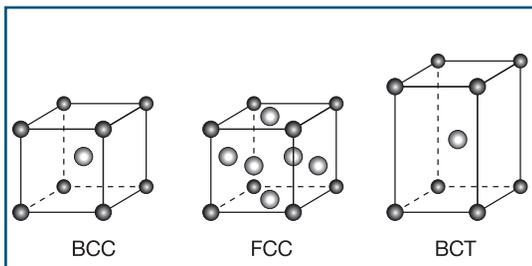


Figura 4. Celdas cristalinas BCC, FCC y BCT

La Martensita corresponde a un arreglo de átomos que tienen una estructura tetragonal centrada en el cuerpo (BCT) (como BCC pero elongada en una dirección). Durante el enfriamiento rápido, la transformación típica de Austenita a Ferrita que se esperaría en un acero con bajo contenido de carbono, se ve interrumpida por la presencia de carbono y de mayor contenido de elementos de aleación, junto con la falta de tiempo para alcanzar un equilibrio mayor.

Debido a que las estructuras martensíticas son duras y frágiles, es necesario un tratamiento térmico posterior (revenido) para reducir su dureza y resistencia y aumentar su ductilidad al nivel requerido para la mayoría de las aplicaciones industriales.

SOLUCIONES SÓLIDAS

Consideremos una aleación de hierro con aproximadamente 13% de cromo. Los átomos de hierro (Fe) y de cromo (Cr) son aproximadamente del mismo tamaño y alrededor de uno de cada siete átomos será de Cr. Esta distribución de átomos en un cristal, en el que los átomos del segundo elemento se distribuyen uniformemente en la estructura del cristal base se conoce como sustitucional. Cuando los átomos se encuentran en sitios exactamente similares a los átomos de Fe, la solución sólida se conoce como sustitucional. Si se añade carbono (C) a la aleación, los átomos de C, siendo más pequeños que los átomos de Fe o de Cr, se distribuyen en los intersticios entre los otros átomos y se forma una solución sólida intersticial.

PROPIEDADES DE LA FERRITA

Es una solución sólida de carbono en hierro alfa. Su solubilidad a la temperatura ambiente es del orden de 0.008% de carbono, por esto se considera como hierro puro. La máxima solubilidad de carbono en el hierro alfa es de 0,02% a 723°C . La Ferrita es la fase más blanda y dúctil de los aceros, es magnética, cristaliza en una red cúbica centrada en el cuerpo (BCC), tiene una dureza aproximada de 90 Brinell, una resistencia a la tracción de unos 28 (kg/mm^2) y un alargamiento del orden de 35%. El contorno de los granos es ligeramente curvilíneo. Se encuentra libre en los aceros de menos de 0.89% de carbono. En conjunto con la Cementita forma Perlita.

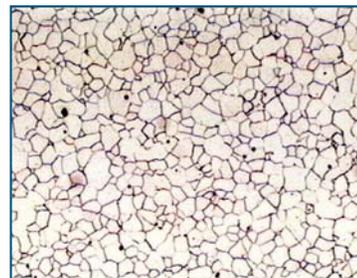


Figura 5. Microestructura del acero al carbono, cristales blancos de Ferrita

PROPIEDADES DE LA AUSTENITA

Está formado por una solución sólida de carbono en hierro gamma. Es blanda, dúctil, tenaz y no magnética. El contorno de los granos es rectilíneo. Es estable por encima de la temperatura crítica Ac_1 . La cantidad de carbono disuelto, varía hasta 2.05 % C, que es la máxima solubilidad a la temperatura de 1130 °C. Está formada por cristales cúbicos centrados en las caras (FCC). Su resistencia varía de 590 a 885 MPa (de 60 a 90 Kg/mm²) .

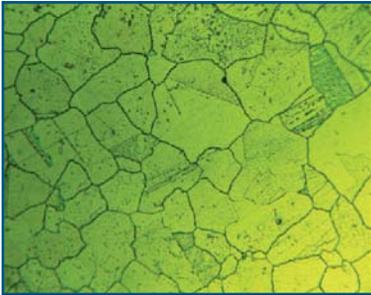


Figura 6. Microestructura de la Austenita

PROPIEDADES DE LA CEMENTITA

Es el carburo de hierro de fórmula Fe_3C . Contiene 6.67% C y 93.33% de Fe. Es el microconstituyente más duro y frágil de los aceros al carbono, alcanzando una dureza Brinell de 700 (68 HRC). En los aceros con más de 0.9% C forma una red que envuelve los granos de Perlita. Forma parte de la Perlita como láminas paralelas separadas por otras láminas de Ferrita. También aparece en los aceros hipoeutectoides que no han sido bien templados.

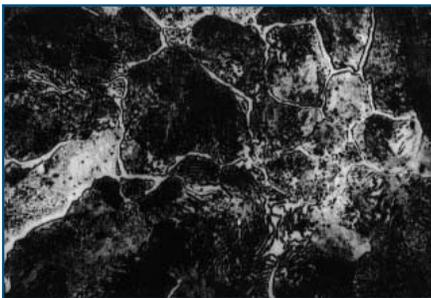


Figura 7. Microestructura del acero 1%C, red blanca de Cementita

PROPIEDADES DE LA PERLITA

Es el microconstituyente eutectoide que contiene el 0.8 % C, formado por capas alternadas de Ferrita y Cementita, esta posee un 88 % de Ferrita y 12 % de Cementita. Tiene una dureza de 250 Brinell, resistencia a la tracción de 80 kg/mm² y un alargamiento del 15%. Su nombre se debe al aspecto que adquiere al iluminarla. La Perlita aparece en general en el enfriamiento lento de la Austenita y específicamente por la transformación isotérmica de la Austenita en el rango de 650 a 723°C.

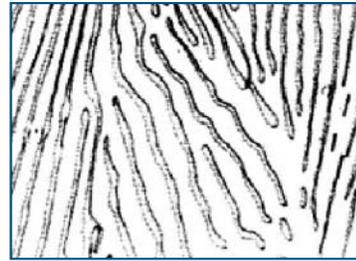


Figura 8. Microestructura de la Perlita, Ferrita en Blanco

PROPIEDADES DE LA MARTENSITA

Es el constituyente de los aceros templados. Es una solución sólida sobresaturada de carbono en Ferrita. Se obtiene por enfriamiento rápido de los aceros desde su estado austenítico a altas temperaturas. El contenido de carbono suele variar desde muy poco carbono hasta el 1%. La Martensita tiene una dureza de 50 a 68 Rc (495 a 745 HB), resistencia a la tracción de 170 a 250 kg/mm², un alargamiento del 0.5 al 2.5 %, es muy frágil y presenta un aspecto acicular. Los aceros templados suelen quedar demasiado duros y frágiles, inconveniente que se corrige por medio del revenido que consiste en calentar el acero a una temperatura inferior a la crítica inferior (723°C), dependiendo de la dureza que se desee obtener, enfriándolo luego al aire.



Figura 9. Microestructura de la Martensita

DIAGRAMA CROMO-HIERRO

La Figura 10 muestra el diagrama de equilibrio estable Cr-Fe, su análisis presenta una forma adecuada de revisar los conceptos básicos detrás de los diferentes tipos de aceros inoxidable: ferríticos, martensíticos, austeníticos, dúplex y endurecibles por precipitación.

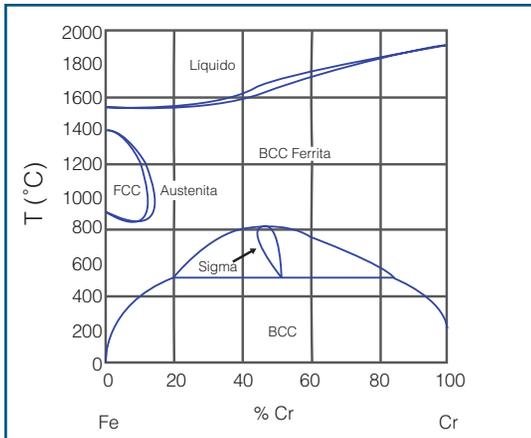


Figura 10. Diagrama de Fases Cromo-Hierro

Del análisis del diagrama Cr-Fe se deduce lo siguiente:

- Las aleaciones hierro-cromo, con menos de 12% de cromo, transforman su estructura ferrítica a austenítica (fase gamma, γ) durante el calentamiento. Por enfriamiento rápido hasta la temperatura ambiente, conseguiremos transformar la Austenita en Martensita (aceros inoxidable martensíticos).
- Las aleaciones de hierro con contenidos de cromo entre 12 y 13% forman a elevadas temperaturas estructuras bifásicas (α y γ) que enfriadas rápidamente a temperatura ambiente, presentarán una estructura formada por Ferrita y Martensita (aceros ferríticos-martensíticos).
- Las aleaciones hierro-cromo con más de 13% de Cr, mantienen su estructura ferrítica, desde temperatura ambiente hasta el punto de fusión. Durante el calentamiento, dicha estructura no atraviesa el campo austenítico (fase gamma), luego no puede austenizarse y posteriormente templarse para formar Martensita. Estos corresponden a los denominados aceros inoxidable ferríticos. Es importante limitar el contenido de carbono para prevenir que el campo gamma se expanda y prevenir la formación de Martensita (ver Fig. 11).

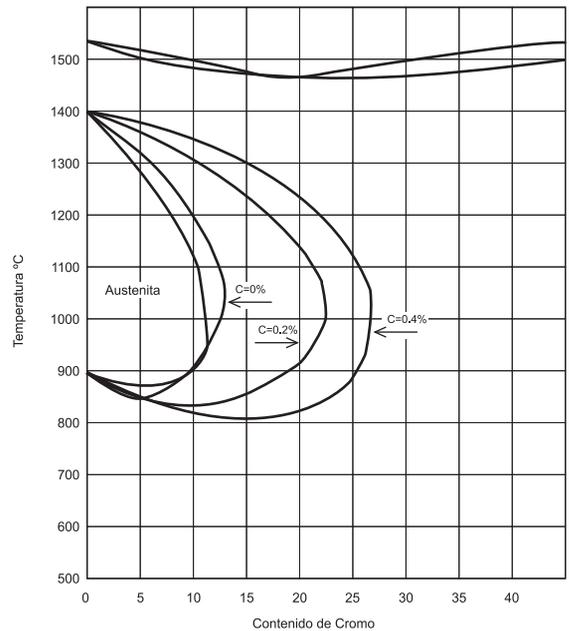


Figura 11. Influencia del carbono ampliando el bucle Gamma

Del diagrama de Influencia del carbono, se deduce lo siguiente:

- En el diagrama hierro-cromo, el bucle gamma se expande a la derecha al aumentar el contenido de carbono de la aleación. El carbono favorece la formación de fase gamma.
- Cabe Señalar que si el carbono alcanza 0.6% el límite del bucle gamma queda limitado para un cromo aproximado del 18%. Por lo tanto, con carbono superior al 0.4% ya no se amplía el bucle y el exceso de carbono queda en el acero formando distintos tipos de carburos de hierro y cromo que dependen de la temperatura, del contenido de carbono y de cromo.
- Las aleaciones hierro-cromo-carbono, con contenidos de cromo superior a 27% son ferríticas.
- Se pueden conseguir aleaciones hierro-cromo-carbono de hasta aproximadamente 17% de cromo que sean martensíticas a temperatura ambiente.

CLASIFICACIÓN DE ACUERDO A SU MICROESTRUCTURA

Los tres tipos principales de aceros inoxidable utilizados en la industria son las clases Martensítica, Ferrítica y Austenítica, nombres derivados de la fase predominante que se encuentra a temperatura ambiente. Una cuarta clase, los tipos PH (Precipitation Hardening) o de Endurecimiento por Precipitación, ha alcanzado importancia en las últimas décadas. En los últimos años, la clase Dúplex ha despertado gran interés.

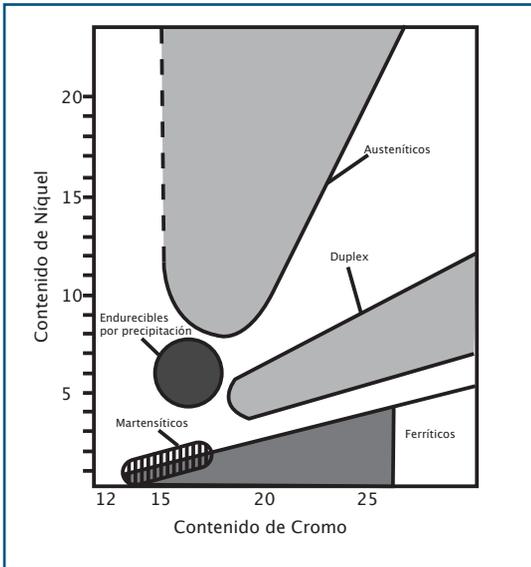


Figura 12. Relación entre el contenido de cromo y níquel en los distintos grupos de aceros inoxidables

Aceros Inoxidables Austeníticos

La clase austenítica contiene níquel como segundo elemento principal de aleación. El Ni se utiliza para suprimir la transformación de la Austenita y hacerla estable incluso a temperatura ambiente y más baja. Así, cuando el níquel se agrega al acero inoxidable en cantidades suficientes, la estructura cambia a Austenita.

Los metales de aporte serie 300 de acero inoxidable Austenítico (con contenido de Cr que varía desde 15-32% y contenido de Ni de 8-37% aproximadamente) se utilizan en la mayor parte de las aplicaciones de soldadura ya que ellos son mucho más soldables que los aceros inoxidables ferríticos, martensíticos o de endurecimiento por precipitación.

Características básicas

- Elevada resistencia a la corrosión en una amplia gama de ambientes corrosivos, generalmente mejor que la de los aceros Martensíticos o Ferríticos, pero son vulnerables al agrietamiento por corrosión bajo tensiones (SCC) en ambientes de cloruro.
- Excelente soldabilidad, mejor que los grados Ferríticos y Martensíticos.
- Sobresaliente maleabilidad y ductilidad, mejor que los grados Ferríticos y Martensíticos.
- Muy buenas propiedades criogénicas y buena resistencia a alta temperatura. La plasticidad de la estructura de la Austenita, transmite a estos aceros, su tenacidad, reducción en área y excelente resistencia al impacto aun a temperaturas criogénicas.
- Endurecible solamente por trabajo en frío. Los aceros inoxidables Austeníticos no pueden ser templados para obtener Martensita, ya que el Níquel estabiliza la Austenita a temperatura ambiente e incluso por debajo de ella.
- Comparado con el acero al carbono posee menor punto de fusión, menor conductividad térmica, mayor resistencia eléctrica y coeficientes de expansión térmica aproximadamente 50% mayores.

Las características magnéticas de los metales de aporte de acero inoxidable austenítico varían desde no magnéticos como en los Tipos 310, 320 y 330 completamente austeníticos a notablemente magnéticos como en el Tipo 312, que contiene más de un 25% de Ferrita. La mayoría de los aceros inoxidables austeníticos comunes tales como 308(L), 309(L), 316(L) y 347 son levemente magnéticos debido a la presencia de algo de Ferrita.

Aplicaciones típicas

- Algunos aceros completamente austeníticos pueden ser usados a temperaturas tan bajas como -270°C .
- Plantas y equipos químicos.
- Equipos para procesamiento de alimentos.
- Usos arquitectónicos.



ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS

Se caracterizan por una estructura ferrítica a cualquier temperatura ya que no presentan transformación de Ferrita en Austenita durante el calentamiento ni transformación martensítica en el enfriamiento. Por esta razón no hay posibilidad de cambios de fase. Como se observa en el gráfico 11, si a un acero inoxidable se le aumenta el porcentaje de Cr y se limita la cantidad de C la vertical que representa a aleación se situará a la derecha del bucle gamma y el acero será ferrítico a cualquier temperatura, ya que no atraviesa ninguna línea de transformación, y no podrá ser templado, como por ejemplo los inoxidables tipo 430, 442, y 446. Los aceros Ferríticos son conocidos como los aceros inoxidables de cromo directo. Su contenido de cromo que varía entre 10.5% (Tipo 409) y el 30% (Tipo 448), pero con bajo contenido de carbono. Ejemplos son los aceros AISI 405, 430, 442 y 446. La más común de las aleaciones es la tipo 430 (UNS S43000), con 16% a 18% de cromo, 0.12% máx. de carbono.

Características básicas

- Soldabilidad frecuentemente mayor que los grados martensíticos pero menor que los grados austeníticos.
- Resistencia a la corrosión algo superior a la de los aceros inoxidables martensíticos, pero inferior a la de los grados austeníticos. La presencia de cromo incrementa dicha resistencia. La ausencia de níquel reduce la resistencia general a la corrosión y los hace susceptibles en muchos medios como por ejemplo en H_2S , NH_4Cl , NH_4NO_3 y soluciones de H_2O_2 . Los aceros con menor contenido de cromo (10,5%) se les suele denominar inoxidables al agua, pues no resisten sostenidamente medios más agresivos.
- Es propenso a aumentar el tamaño del grano a temperaturas elevadas y adquiere cierta fragilidad con permanencias prolongadas entre 450° y 500°C (fragilidad a 475°C).
- Aceros de 25-30% de cromo presentan buena resistencia a la corrosión y en atmósferas sulfurosas en caliente.
- Buena resistencia a la corrosión bajo tensión SCC, especialmente en cloruros a alta temperatura, comparada con los grados austeníticos. Pequeñas cantidades de Níquel, tan bajas como 1,5% son suficientes para inducir SCC.
- No endurecible por el tratamiento térmico, sólo moderadamente por trabajo en frío, generalmente menos que los aceros inoxidables austeníticos.
- Menor ductilidad que los aceros austeníticos, debido a la inherente menor plasticidad de la estructura cúbica centrada en el cuerpo del hierro alfa. Maleabilidad no tan buena como los grados austeníticos pero suficiente para trabajarlos fácilmente en frío.
- Menor tenacidad que los grados austeníticos.
- Alcanzan su máxima ductilidad y resistencia a la corrosión en la condición de recocido.
- La Ferrita generalmente disminuye la dureza y la resistencia al impacto a temperaturas criogénicas.
- Son bastante magnéticos y están expuestos a la desviación de arco (Soplo magnético).
- Excelente resistencia al "pitting" y a la corrosión por rendija (Crevice) inducida por cloruros.
- Se les prefiere en general por su resistencia a la corrosión y bajo costo, más que por sus propiedades mecánicas.

Aplicaciones típicas

- Tubos de intercambiadores de calor donde el SCC sea un problema, por ejemplo en plantas de procesamiento de petróleo o gas natural.
- Estampado profundos de piezas como recipientes para industrias químicas, alimenticias, y para adornos arquitectónicos o automotrices.
- Aplicaciones de resistencia al agrietamiento por corrosión de tensiones de cloruro, corrosión en medios acuosos, oxidación a alta temperatura y corrosión por picadura y por hendidura por medios de cloruro.
- Tubos de escape de automóviles, tanques de radiadores, reactores catalíticos y alcantarillas.
- Adornos decorativos y tanques de ácido nítrico.
- Componentes que requieren protección contra subidas de temperatura tales como partes de hornos, boquillas y cámaras de combustión.
- Tanques de agua caliente.



ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS

Son aleaciones que atraviesan el campo gamma del diagrama de equilibrio Cr-Fe (ver Fig.10) debido a lo cual pueden austenizarse y templarse. Pueden estar aleados con pequeñas cantidades de otros elementos. Son ferríticos en estado de recocido pero martensíticos con un enfriamiento más rápido ya sea en aire o en un medio líquido desde una temperatura superior a la crítica. Fueron los primeros aceros inoxidable desarrollados comercialmente (como cuchillería) y tienen contenido relativamente alto del carbono (0,1 - 1,2%) comparado a otros aceros inoxidable. Aceros de este grupo en general no contienen más de 14% de Cr – excepto los tipos 440 A, B, y C que contienen 16-18%Cr y una cantidad de Carbono suficiente para producir el endurecimiento. Junto con la clase de aceros inoxidable Ferríticos comparten la denominada serie AISI 400. En contraste con los aceros inoxidable auténticos, no contienen níquel como elemento de aleación. Algunos ejemplos son aceros tipo AISI 410, 416, 420, 431, 501 y 502.

Características básicas

- Moderada resistencia a la corrosión. Usualmente menor que la de los aceros austeníticos y ferríticos.
- Baja soldabilidad, variando con el contenido de carbono. A mayor contenido de carbono, mayor será la necesidad de precalentar y realizar tratamientos térmicos posteriores, para producir soldaduras libres de defectos.
- Excelente resistencia mecánica.
- Puede ser endurecido por el tratamiento térmico y así alcanzar altos niveles de resistencia y dureza. Son endurecidos por aire cuando se enfrían rápidamente desde el rango de temperatura de austenizado (871°C-1010°C) en donde la fase austenítica es predominante. Ligeramente endurecibles por trabajo en frío.
- Son bastante magnéticos al igual que los aceros inoxidable ferríticos, por lo tanto están sujetos al desvío del arco en la soldadura.
- Son adecuados para temperatura moderadamente alta debido a la buena resistencia al creep y a la tensión en dicho rango de temperatura.
- Cuando reciben tratamiento térmico apropiado tienen la resistencia a la corrosión adecuada en muchos ambientes, ofrecen mayor resistencia y buenas propiedades de fatiga junto con excelente resistencia a la oxidación y al desgaste.

- Estas aleaciones se seleccionan a menudo por sus buenas propiedades mecánicas y bajo costo.

Aplicaciones típicas

En piezas que están sometidas a corrosión y que requieren cierta resistencia mecánica.

- Aspas de turbinas (Tipo 403).
- Revestimiento de asientos para válvulas.
- Carcasas de bombas.
- Cuerpos de válvulas y compresores.
- Cuchillería, Hojas de afeitar e instrumentos quirúrgicos (Tipos 420 y 431).
- Ejes, husos y pernos.



ACEROS INOXIDABLES ENDURECIBLES POR PRECIPITACIÓN

Son aleaciones base hierro, con Cr entre 12% y 18% y Ni entre 4% y 9%, además de elementos aleantes que producen el endurecimiento por precipitación tales como Molibdeno (Mo), Titanio (Ti), Nitrogeno (N), Cobre (Cr), Aluminio (Al), Tantalio (Ta), Niobio (Nb), Boro (B) y Vanadio (V).

Han sido formulados de tal forma que puedan ser suministrados en condición de solución sólida (en la cual ellos son maquinables) y así puedan ser endurecidos después de la fabricación a través de un proceso de "envejecimiento" a baja temperatura entre 482-593°C minimizando los problemas asociados con los tratamientos a temperaturas elevadas. El principio del endurecimiento por precipitación es que una solución sólida cambia su estructura metalúrgica con el envejecimiento.

Características Básicas

- Moderada a buena resistencia a la corrosión.
- Muy alta resistencia. Pueden lograrse hasta aproximadamente 1800 Mpa (excediendo la resistencia de los aceros inoxidable martensíticos) con resistencia a corrosión similar a la del Tipo 304.
- Buena soldabilidad.
- Magnéticos.

Aplicaciones típicas

- Servicios a alta temperatura como intercambiadores de calor y tubos de sobrecalentamiento de calderas a vapor.
- Componentes aeroespaciales y marinos.
- Tanques de combustibles.
- Partes de bombas.
- Ejes y pernos.
- Sierras, cuchillos y juntas tipo fuelle flexibles.

ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX

Son aleaciones base hierro con Cr, Mo y una cantidad de estabilizadores de la Austenita como Ni y N para lograr el balance deseado entre las fases ferríticas y austeníticas de donde deriva su denominación dúplex. El nitrógeno aumenta el límite de fluencia y reduce la velocidad de la formación de compuestos intermetálicos frágiles. El molibdeno mejora la resistencia a la corrosión por picadura y rendija.

Fueron desarrollados considerando que los aceros inoxidable austeníticos son vulnerables al agrietamiento por corrosión de tensiones (SCC) en ambientes de cloruro, aunque presentan una excelente soldabilidad. Los aceros inoxidable ferríticos tienden a ser frágiles y son difíciles de soldar pero resisten el SCC. Los aceros inoxidable dúplex combinan algunas de las mejores características de los aceros inoxidable austeníticos y ferríticos. La Austenita proporciona ductilidad y la Ferrita resistencia al SCC. Debido al balance existente entre estas dos fases, presentan ventajas en severas condiciones de temperatura y contenido de cloruros, donde los Inoxidables austeníticos sufren SCC, picaduras y rendijas.

El contenido típico de Ferrita de estos aceros va entre un 40 y 60%. Contienen Cr relativamente alto (entre 18 y 28%) para mantener la resistencia a la corrosión de los aceros Austeníticos y cantidades moderadas de Ni (entre 4.5 y 8%) para aumentar el contenido de Ferrita y así aumentar la resistencia a SCC en medios con cloruros a alta temperatura.

Ejemplos de aleaciones dúplex son los grados 312, 315, 318, 325 y 329. La aleación 2205 (UNS S31803) es una de las aleaciones dúplex más ampliamente usada. Comparando la composición de esta aleación con una de acero inoxidable completamente austenítico, tal como el tipo 316, la aleación 2205 es más alta en cromo, más baja en níquel y contiene nitrógeno.

Características básicas.

- Comparados con los grados austeníticos, los aceros inoxidable dúplex presentan mayor resistencia mecánica y una resistencia considerablemente mayor al SCC en soluciones de cloruro a expensas de una tenacidad, ductilidad y soldabilidad levemente menor.
- Mas alta resistencia a la tracción y punto de fluencia que los aceros austeníticos y ferríticos.
- Buena soldabilidad y maleabilidad.

- Resistencia intermedia a la corrosión por fatiga inducida por cloruros, entre los aceros austeníticos y ferríticos.
- Resistencia a la corrosión general y por picado, igual o mejor que la del tipo 316L, en muchos ambientes corrosivos.
- Resistencia a la corrosión intergranular, debido al bajo contenido de carbono.
- Buena resistencia a la erosión y abrasión.
- Coeficiente de expansión térmica cercano al del acero al carbono, lo cual puede resultar en menores tensiones en las soldaduras que involucren inoxidable dúplex con acero al carbono.
- Normalmente se utilizan en un rango de temperaturas entre $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $260\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Aplicaciones típicas

- Tuberías de intercambiadores térmicos, tuberías de petróleo, plataformas de ultramar, pozos de gas, tuberías en línea, cuerpos de válvulas para manejar agua de mar y bombas de fundición.
- Industria de procesamiento químico.
- Usos marinos, particularmente a temperaturas levemente elevadas.
- Plantas de desalación.
- Plantas petroquímicas.
- Industria de la Celulosa.



CORROSIÓN

Cuando los Aceros Inoxidables sufren corrosión, generalmente no es uniforme como en el caso de los aceros al carbono, sino localizada. Debido a ello no puede prevenirse con espesores adicionales, sino que debe evitarse la corrosión misma por medio de un conocimiento profundo del medio corrosivo y del acero utilizado. Los aceros inoxidables no son atacados por el ácido nítrico u otros ácidos oxidantes, que facilitan la formación de la película protectora. Por otra parte, en general, estos aceros no resisten la presencia de ácidos reductores como el ácido clorhídrico o fluorhídrico, y son atacados por las sales de ellos (cloruros, fluoruros, bromuros y yoduros).

CORROSIÓN GENERALIZADA

Se debe al debilitamiento uniforme del film de pasivación (óxido de cromo) sobre toda la superficie del acero. Generalmente



ocurre a causa de la mala selección del tipo de acero inoxidable. Un ejemplo de corrosión generalizada es exponer un acero inoxidable de tipo ferrítico de bajo contenido de cromo (AISI 430) a una moderada solución de ácido sulfúrico a temperatura. Se caracteriza por la presencia de herrumbre en el acero. La vida de componentes se puede estimar en base a los resultados de pruebas de inmersión. Algunos métodos usados para prevenir o reducir la corrosión general son: recubrimientos, inhibidores, y protección catódica.

CORROSIÓN INTERGRANULAR

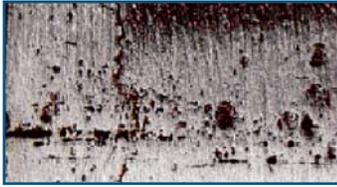
Este tipo de corrosión ataca generalmente a los aceros del tipo 18/8 (serie 300), que se expone a temperaturas entre $430\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $870\text{ }^{\circ}\text{C}$,



estas temperaturas se presentan en las proximidades de las zonas soldadas. Se forman carburos de cromo en los límites de los cristales de Austenita, empobreciendo la zona adyacente de este elemento (cromo) y quedando de esta forma expuesto a la corrosión. Una forma de evitar la corrosión intergranular es usar aceros de bajo contenido de carbono (tipo L), y cuando las condiciones de temperatura son aún más severas se debe usar aceros estabilizados.

CORROSIÓN POR PICADURAS (PITTING)

Las picaduras son una forma localizada de ataque corrosivo. Se caracteriza por la formación de agujeros en el metal. Estos



agujeros pueden ser pequeños y difíciles de detectar visualmente debido a la corrosión general. El pitting se asocia con discontinuidades localizadas del film de pasivación. La sensibilidad al pitting aumenta con condiciones extremas de agentes corrosivos, imperfecciones mecánicas, tales como partículas extrañas, daño en la superficie del material, o por fallas en la película de óxido de cromo. El fenómeno ocurre cuando se rompe la capa pasivante y hay un ataque muy localizado. Algunos métodos para reducir los efectos de la corrosión por picaduras son: reducir la agresividad del ambiente y utilizar materiales resistentes a las picaduras. Es posible prevenir o retardar este efecto, usando aceros con contenido de Molibdeno, como el 316.

CORROSIÓN GALVÁNICA

Todos los aceros inoxidables son susceptibles a este tipo de corrosión. Se produce por el contacto de dos



metales de distinto potencial de oxidación que están en contacto en un medio corrosivo. Como un metal altamente resistente a la corrosión, el acero inoxidable puede actuar como cátodo cuando está en contacto con material menos noble, generándose un fenómeno electrolítico que daña la superficie del acero inoxidable.

CORROSIÓN BAJO TENSIÓN (STRESS CORROSIÓN CRACKING, SCC)

La corrosión bajo tensiones corresponde a una falla de material, la cual es originada por la presencia simultánea de



un ambiente adecuado, un material susceptible, y la presencia de tensiones. La temperatura es un factor ambiental significativo que afecta el agrietamiento. La tensión umbral está frecuentemente por debajo del punto de fluencia del material. Una falla catastrófica puede ocurrir sin deformación significativa o el deterioro visible del componente. La soldadura genera gradientes de temperatura y así puede inducir tensiones residuales, lo cual en ciertos ambientes puede resultar en rotura por corrosión bajo tensiones. Este tipo de corrosión es el menos frecuente, se trata de un tipo de corrosión transgranular, el cual es producido por tensiones generadas en el material, tales como tracción, deformación en frío, soldaduras, etc., ante la presencia de agentes químicos, principalmente compuestos clorados. Este tipo de corrosión se manifiesta por pequeñas fisuras en las zonas expuestas a tensión. Algunos métodos para prevenir la corrosión bajo tensiones son: selección apropiada del material, remover la especie química que promueve el agrietamiento, cambiar el proceso de fabricación o diseñar adecuadamente para reducir las tensiones.

CORROSIÓN POR GRIETAS (CREVICE)

La corrosión por grietas ocurre en las aberturas o los espacios estrechos entre dos superficies del metal o entre superficies de metales y no metales. La aireación diferenciada



entre la grieta (microambiente) y la superficie externa da a la grieta un carácter anódico. Esto puede contribuir a una condición altamente corrosiva en la grieta. Algunos ejemplos de grietas se forman en rebordes, arandelas, juntas, empalmes rosca-dos y anillos. Algunos métodos para reducir los efectos de la corrosión de este tipo de corrosión son: eliminar la grieta en la etapa de diseño, seleccionar materiales más resistentes a este tipo de corrosión y reducir la agresividad del ambiente.

CORROSIÓN MARINA

La corrosión marina considera la inmersión de componentes en agua de mar, equipos y tuberías que



utilizan dicha agua, y corrosión en atmósferas marinas. La corrosión de un componente puede variar dependiendo de si está en una atmósfera marina, en una zona de salpicadura, o sumergido en el agua de mar. Además de la sal (NaCl), en agua de mar hay otros componentes como gases disueltos y organismos vivos. Las atmósferas marinas se consideran generalmente uno de los ambientes más agresivos para la corrosión. Algunos factores que afectan la velocidad de corrosión en atmósferas marinas son: humedad, viento, temperatura, contaminantes aerotransportados, localización y organismos biológicos. La selección de la aleación, recubrimientos metálicos, recubrimientos orgánicos, y protección catódica son métodos de uso general para proporcionar protección apropiada a la corrosión. La protección catódica puede ser lograda usando un sistema de corrientes inducidas o impresas o un sistema de ánodo de sacrificio.

ACEROS INOXIDABLES A BAJAS TEMPERATURAS

Los criterios de selección de aceros inoxidable para aplicaciones a bajas temperaturas están basados en la energía mínima de impacto del ensayo Charpy a una temperatura dada.

Transición Dúctil Frágil

En metales con estructuras BCC tales como aceros al carbono y de baja aleación, se da una característica única durante los ensayos de impacto en el rango de temperatura entre -120 a -130°C , aproximadamente. Esta característica es una transición Dúctil-Frágil en la resistencia al impacto. En el límite superior del rango de temperatura, el comportamiento es dúctil con un marcado grado de deformación plástica. En el límite inferior del rango de temperatura, la fractura es frágil y con poca o nula deformación plástica.

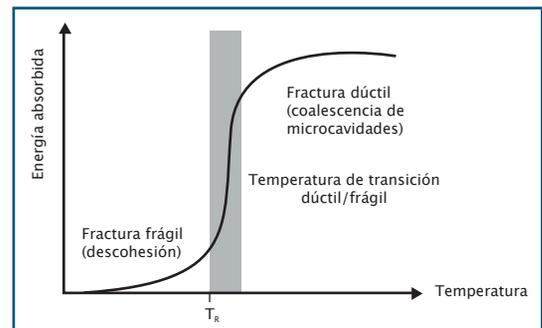


Figura 13. Curva de Transición Dúctil Frágil

Propiedades a bajas Temperaturas

Los aceros Austeníticos tienen una muy buena resistencia al impacto. Energías de 135 [J] o mayores en el ensayo de Charpy es un valor típico a temperatura ambiente y, comúnmente, mantienen valores que exceden los 135 [J] incluso a muy bajas temperaturas.

Los aceros inoxidable Martensíticos y Ferríticos presentan una resistencia al impacto que decrece al disminuir la temperatura, y el modo de fractura cambia de dúctil, a temperaturas medianamente elevadas, a frágil a temperaturas bajas. Por otra parte, el rango de temperaturas en que se produce la transición se ve afectado por tratamientos térmicos, el trabajo en frío y la composición química. Los tratamientos térmicos que resultan en altas durezas, mueven el rango de transición a mayores temperaturas, y aquellos que resultan en una disminución en la dureza mueven el rango de transición hacia menores temperaturas. Generalmente la transición de un acero martensítico, por ejemplo el 410, ocurre en el rango de -75 a 95°C , que es el rango de temperaturas en que generalmente son usados los aceros inoxidable martensíticos.

Los aceros inoxidable austeníticos, han sido utilizados ampliamente para aplicaciones a temperaturas menores que cero hasta -270°C. Estos aceros contienen suficiente contenido de Níquel y Manganeso como para retener la estructura FCC al enfriar desde la temperatura de trabajo en caliente o de recocido.

El trabajo en frío a temperaturas del orden de -195°C es altamente efectivo en aumentar la resistencia a la tracción de estos aceros. Para aceros inoxidable metalúrgicamente inestables a muy bajas temperaturas tales como 301, 304 y 304L, la deformación plástica a temperaturas menores que cero puede provocar una transformación parcial en Martensita, la cual incrementa la resistencia a la tracción. Para algunas aplicaciones criogénicas es deseable utilizar un acero inoxidable estable para condiciones de exposición criogénicas tal como el tipo 310.

Para componentes de alta resistencia en estructuras criogénicas, hay varios aceros inoxidable que contienen cantidades significativas de manganeso en vez de algo de níquel, además de pequeñas cantidades de nitrógeno y otros elementos que incrementan la resistencia. Adicionalmente, el trabajo en frío incrementa substancialmente la resistencia a la fluencia y a la tracción, y reduce la ductilidad, pero a niveles suficientes para obtener buena resistencia al impacto a temperaturas criogénicas.

ACEROS INOXIDABLES A ALTAS TEMPERATURAS RESISTENCIA A LA OXIDACIÓN (SCALING)

La resistencia a la oxidación, o scaling, depende del contenido de Cromo de la aleación cromo-hierro, como se muestra en la Fig.14. La mayoría de los aceros austeníticos, con contenido de cromo de por lo menos 18%, pueden ser usados a temperaturas de hasta aproximadamente 870°C y grados como el 309 y 310 incluso a mayores temperaturas. La mayoría de los aceros martensíticos y ferríticos tienen menores resistencias a la oxidación y por lo tanto resisten menores temperaturas de operación. Una excepción a esto es el grado ferrítico 446 con aproximadamente 24% de Cromo, el cual puede ser usado para resistir el Scaling a temperaturas de hasta 1100°C.

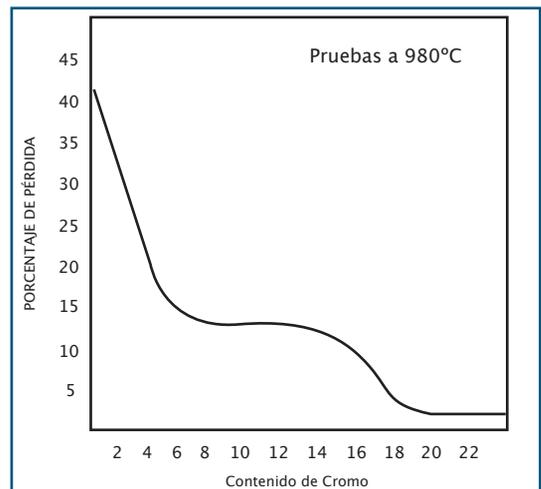


Figura 14. Efecto del cromo en la resistencia al Scaling

La tabla 1 muestra una aproximación a la temperatura máxima de servicio a la cual varios grados de aceros inoxidable pueden ser usados para resistir la oxidación en el aire seco. Cabe señalar que estas temperaturas dependen mucho de las condiciones ambientales, y en algunas circunstancias, temperaturas substancialmente mas bajas resultan en un Scaling destructivo.

Grado	Intermitente	Continúa
304	870	925
309	980	1095
310	1035	1150
316	870	925
321	870	925
410	815	705
416	760	675
420	735	620
430	870	815

Tabla 1. Temperaturas máximas de servicio en aire seco

Resistencia al Creep

La alta resistencia de los materiales a elevadas temperaturas expresada en términos de su resistencia al creep (habilidad de los materiales a resistir la distorsión sobre largos periodos de exposición a altas temperaturas). Respecto a esto, los aceros inoxidable austeníticos son particularmente buenos.

Los aceros inoxidable dúplex, si bien tienen buena resistencia a la corrosión debido a sus altos contenidos de cromo, sufren de fragilidad si son expuestos a temperaturas por sobre 350°C aproximadamente, por lo cual, están restringidos a aplicaciones por debajo de dicha temperatura.

Los grados martensíticos y los endurecibles por precipitación tienen altas resistencias logradas por medio de tratamientos térmicos. La exposición de estos grados a temperaturas que excedan las temperaturas de tratamiento térmico, resultarían en un ablandamiento permanente, por lo que estos grados son raramente usados a elevadas temperaturas.

Estabilidad microestructural

Cuando algunos aceros inoxidable son expuestos a temperaturas de servicio entre 425 a 815°, se genera precipitación de carburos en los bordes de grano, resultando en una reducción de la resistencia a la corrosión. Para evitarlo, se considera el uso de grados estabilizados (ej: 321) o grados bajos en carbono "L".

Otro problema es la formación de fase sigma, dura y frágil, la cual depende del tiempo de exposición, de la temperatura de servicio y de la composición química del acero. En general el grado 304 es prácticamente inmune a la formación de fase sigma, pero no aquellos grados con mayores contenidos de carbono, molibdeno y silicio.

Expansión Térmica

Puede ser calculada multiplicando la dimensión original por el diferencial de temperatura y por el coeficiente de expansión térmica.

Acero al Carbono	12
Austeníticos	17
Duplex	14
Ferríticos	10
Martensíticos	10

Tabla 2. Coeficientes de expansión térmica

El efecto de la expansión térmica es más notable cuando los componentes están restringidos en su movimiento, ya que la expansión origina distorsiones en el material. También pueden surgir problemas si dos metales disímiles son soldados. En general, las relativamente altas tasas de expansión térmica en los inoxidable austeníticos se traducen en que la fabricación en estas aleaciones puedan tener más problemas dimensionales que fabricaciones similares en aceros al carbono, baja aleación, ferríticos, martensíticos o aceros inoxidable dúplex.

SELECCIÓN DE ELECTRODOS PARA ACEROS INOXIDABLES

IMPORTANCIA DEL CONTENIDO DE FERRITA

La estructura de los metales de aporte de acero inoxidable austeníticos, varía desde completamente austenítico como el 310 hasta la fase doble austenítica-ferrítica como los grados 308, 309, 312, 316, etc., que contienen un pequeño volumen de fase Ferrita, y asociado al Ferrite number (FN).

En la selección de electrodos inoxidable, se debe considerar que se requiere un porcentaje de Ferrita balanceado para garantizar una adecuada resistencia al agrietamiento, al impacto y a la corrosión de acuerdo a las condiciones de servicio a las cuales estará expuesta la pieza soldada.

Generalmente se desea algo de Ferrita para mejorar la resistencia al agrietamiento. El agrietamiento en caliente puede producirse cuando compuestos de bajo punto de fusión como Fósforo, Azufre y Silicio quedan atrapados en el metal depositado durante el proceso de enfriamiento. Debido a que estos compuestos son mucho más solubles en Ferrita que en la Austenita, una pequeña cantidad de Ferrita puede "absorber" cantidades significativas de impurezas. La mayoría de los depósitos de soldadura de acero inoxidable austenítico contienen entre un 3% a un 20% de Ferrita. Con estos porcentajes disminuye la posibilidad de agrietamiento en caliente. Las técnicas de soldadura pueden jugar un papel importante en el contenido de Ferrita. Mientras que un 10% de Ferrita puede ser considerado normal para un cordón en particular, un arco demasiado largo al inicio o al final del cordón puede resultar en 0% en estos puntos, haciéndolo vulnerables a las grietas.

Hay aplicaciones donde la presencia de Ferrita en la soldadura no es beneficiosa. La fase sigma se forma más fácilmente a partir de Ferrita que de Austenita. En aplicaciones criogénicas la resistencia al impacto a baja temperatura disminuye con el incremento del porcentaje de Ferrita. Sobre aproximadamente 10 FN aumenta la posibilidad de que la Ferrita se transforme en fase sigma

frágil cuando la temperatura de servicio está dentro del rango 540-900°C aproximadamente. A temperaturas criogénicas (-195 °C), la dureza y la resistencia al impacto se ven reducidas por la Ferrita, y es una práctica común especificar soldaduras con no más de 2 FN y preferiblemente 0 FN. Es preferible también tener baja Ferrita cuando las soldaduras se exponen a temperaturas entre 480 y 925 °C, para evitar una pérdida de ductilidad a temperatura ambiente como resultado de una fase sigma de alta temperatura.

En los grados al molibdeno como 316, 317 y sus versiones L, la Ferrita puede producir una disminución importante en la resistencia a la corrosión en un medio de oxidación caliente.

Excluyendo servicios especiales, tales como aplicaciones criogénicas o medios corrosivos a altas temperaturas, un FN entre 5 y 10 se considera adecuado para minimizar el micro agrietamiento y la corrosión por tensiones. De lo anteriormente expuesto queda en evidencia la importancia de poder estimar y medir el porcentaje de Ferrita en el proceso de selección de electrodos.

MEDICIÓN Y ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE FERRITA

El contenido real de Ferrita se puede determinar mediante instrumentos de laboratorio sensibles al magnetismo o bien se puede estimar por medio de un examen metalográfico o a través de gráficos especialmente diseñados conociendo la composición química del metal depositado.

Medición del contenido de Ferrita por instrumentos magnéticos

Considerando que la Ferrita es magnética y la Austenita no, la cantidad de Ferrita en una soldadura puede determinarse midiendo su atracción magnética, la cual es directamente proporcional a la cantidad de Ferrita presente.

Existen diferentes instrumentos disponibles para esta medición. El Severn Gauge compara densidades y de esta manera aísla las cantidades de Ferrita. El Magna Gauge mide la tensión requerida por un resorte para separar a un imán de la soldadura. La fuerza necesaria es relacionada con el porcentaje de Ferrita. Este equipo es más exacto pero está limitado como instrumento de laboratorio mientras que el Severn Gauge se puede aplicar en fábrica y obra. La calibración de dichos instrumentos es crítica. La AWS ha desarrollado un procedimiento de calibración, además de detallar como se debe realizar el relleno y la preparación para el muestreo, dado que estos influyen la medición.

Estimación del contenido de Ferrita mediante examen metalográfico

Este método es más exacto cuando la Ferrita está en un rango de 4 a 10%. Una de las ventajas de dicho método es que puede usar pequeñas muestras obtenidas del metal depositado y puede ser usado cuando los otros métodos no sean prácticos.

Estimación del contenido de Ferrita por la composición química del metal depositado

Se han desarrollado a través de los años diferentes diagramas para predecir el porcentaje de Ferrita. Los resultados obtenidos con los diferentes diagramas pueden presentar diferencias. Algunos diagramas son:

- Diagrama de Maurer.
- Diagrama de Schaeffler (ver Fig.22).
- Diagrama DeLong (ver Fig.23).
- Diagrama WRC-1988.
- Diagrama Espy.

Al principio, los diagramas representaban la Ferrita en unidades de volumen (%). Los diagramas más recientes del Welding Research Council, WRC, determinan el número de Ferrita, FN, por respuesta magnética. El FN y el volumen (%) son equivalentes hasta el 6%, pero difieren a niveles más altos.

El contenido de Ferrita en el metal de aporte de acero inoxidable austenítico, puede controlarse al variar la composición química. El cromo promueve la formación de Ferrita, mientras que el níquel se opone a dicha formación. Otros elementos actúan con distintos grados de potencia de la misma manera como lo hace el cromo o el níquel. Por esta razón tenemos un equivalente de cromo (ferritizantes) vs. un equivalente de níquel (austenitizantes).

DIAGRAMA DE SCHAEFFLER

Procede de su antecesor, el diagrama de Maurer, el cual presenta las estructuras que va a presentar un acero al Cr-Ni de acuerdo a los porcentajes de estos presentes en el acero. Antón Scheaffler lo mejoró, incorporando la influencia de distintos elementos de aleación en la formación de Ferrita y Austenita. Se definió así el concepto de Cromo equivalente y Níquel equivalente. El cromo equivalente incorpora los elementos alfa (formadores de Ferrita) y el níquel equivalente los elementos gamma (formadores de Austenita). Cada elemento va multiplicado por un factor que depende de su grado de influencia en la formación de Ferrita o Austenita respectivamente.

Cromo equivalente:

$$\%Cr + \%Mo + (1,5 \times \%Si) + (0,5 \times \%Nb).$$

Níquel Equivalente:

$$\%Ni + (30 \times \%C) + (0,5 \times \%Mn).$$

El diagrama de Schaeffler muestra la presencia de las fases Austenítica, Ferrítica y Martensítica propias de los aceros Inoxidables cuando son enfriados a las velocidades normales de soldadura. Además presenta las zonas de fragilización en Frío debido a la presencia de Martensita, la zona de Fragilidad en caliente originada por la presencia de Austenita, la zona de Fragilidad por presencia de fase Sigma y la zona de Crecimiento de grano Ferrítico. (ver Fig.17).

El trabajo en el diagrama de Schaeffler fue realizado considerando soldadura manual con electrodos revestidos, donde se asumía que los depósitos contenían aproximadamente de 0,06% de nitrógeno. Con el desarrollo de nuevos procesos de soldadura que incorporan desde el aire atmosférico al metal fundido distintos niveles de Nitrógeno, fue necesario desarrollar nuevos gráficos que incorporaran la influencia del nitrógeno como elemento formador de Ferrita. En estos casos es preferible utilizar una revisión del diagrama de Schaeffler, llamado diagrama de DeLong (ver Fig.16).

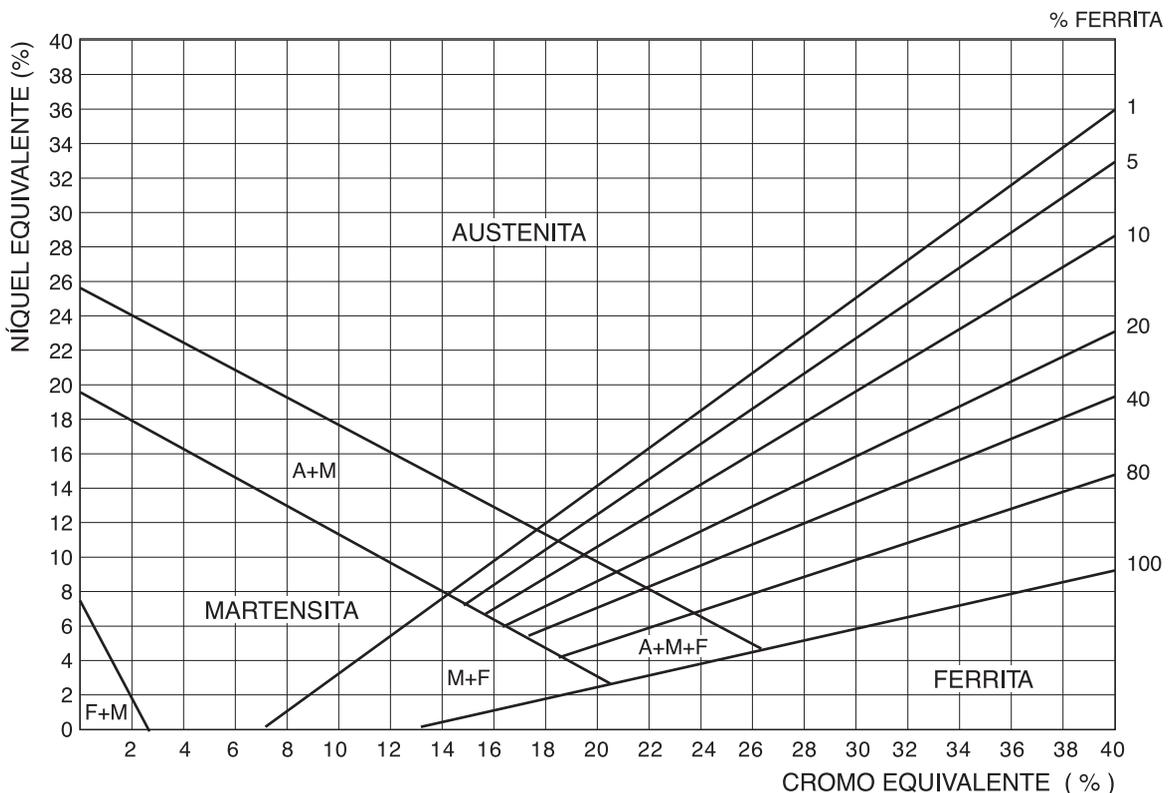
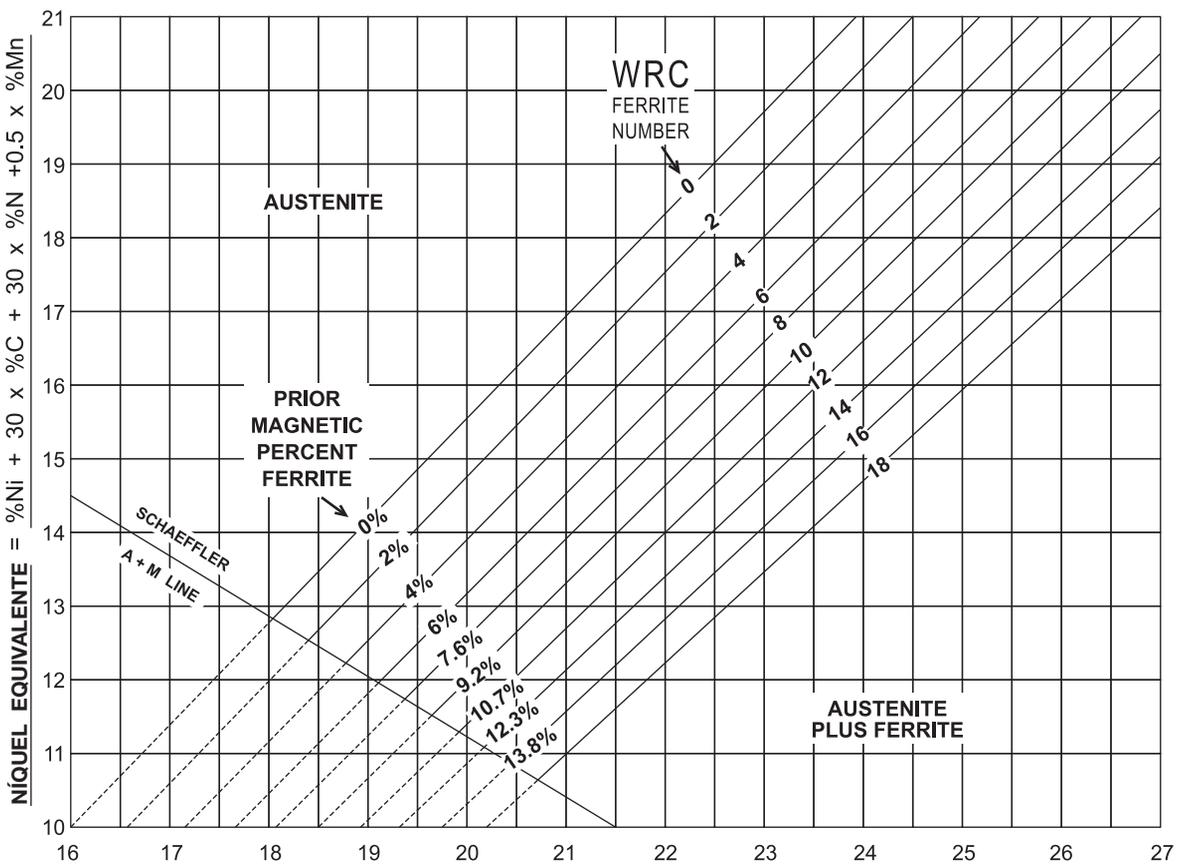


Figura 15. Diagrama de Schaeffler

DIAGRAMA DELONG

Es un diagrama de Schaeffler modificado. Predice el número de Ferrita sobre un FN=18. Este diagrama introduce el nivel de Nitrógeno en la predicción del FN y provee una mejor correlación entre la estimación y la medición del contenido de Ferrita que el diagrama de Schaeffler. Note que la Ferrita que realmente se deposita puede disminuir alrededor de 1FN para GTAW y alrededor de 4FN para GMAW debido al pick up de Nitrogeno en donde la protección del gas es inadecuada. Corresponde a un instrumento empírico desarrollado principalmente alrededor de las aleaciones para soldadura de la década de 1960 y principios de la década de 1970. Cuando las composicio-

nes se alejan apreciablemente de las aleaciones para soldadura comunes durante ese período, el diagrama puede no ser exacto. Existe evidencia considerable de que el Mn a niveles elevados (por sobre 2%) no actúa como un austenizante, por lo que el diagrama tiende a sobreestimar la Ferrita en los metales de aporte con alto contenido de Mn. Este diagrama al igual que el anterior son herramientas útiles siempre que se entiendan sus limitaciones.



CROMO EQUIVALENTE:

$\%Cr + \%Mo + (1,5 \times \%Si) + (0,5 \times \%Nb)$

Figura 16. DeLong (FN) Diagrama para Aceros Inoxidables Soldados

Ejemplo de aplicación del diagrama de Schaeffler

Para efectos prácticos se presentará un ejemplo de aplicación con el Diagrama de Schaeffler. El procedimiento de uso de los otros diagramas es análogo al presentado.

En términos generales, dos son los factores principales que se deben considerar al seleccionar el material de aporte para soldar una junta de acero inoxidable.

1.- La composición química de la soldadura debe ser similar a la del material base con el objeto de resistir a la corrosión.

2.- La estructura final debe tener las características mecánicas apropiadas de acuerdo a las condiciones de servicio a las cuales estará expuesta. Dichas características dependen del punto del diagrama donde se ubique el metal depositado, el cual a su vez es una mezcla del metal de aporte y los materiales base los cuales pueden ser disímiles.

La zona del diagrama 17 con estructuras tenaces es pequeña (zona 5, sombreada). De este punto de vista, la zona mas apreciada es la Austenítica con entre un 5% y un 10% de Ferrita. De lo anteriormente expuesto queda en evidencia la importancia de una cuidadosa selección del metal de aporte.

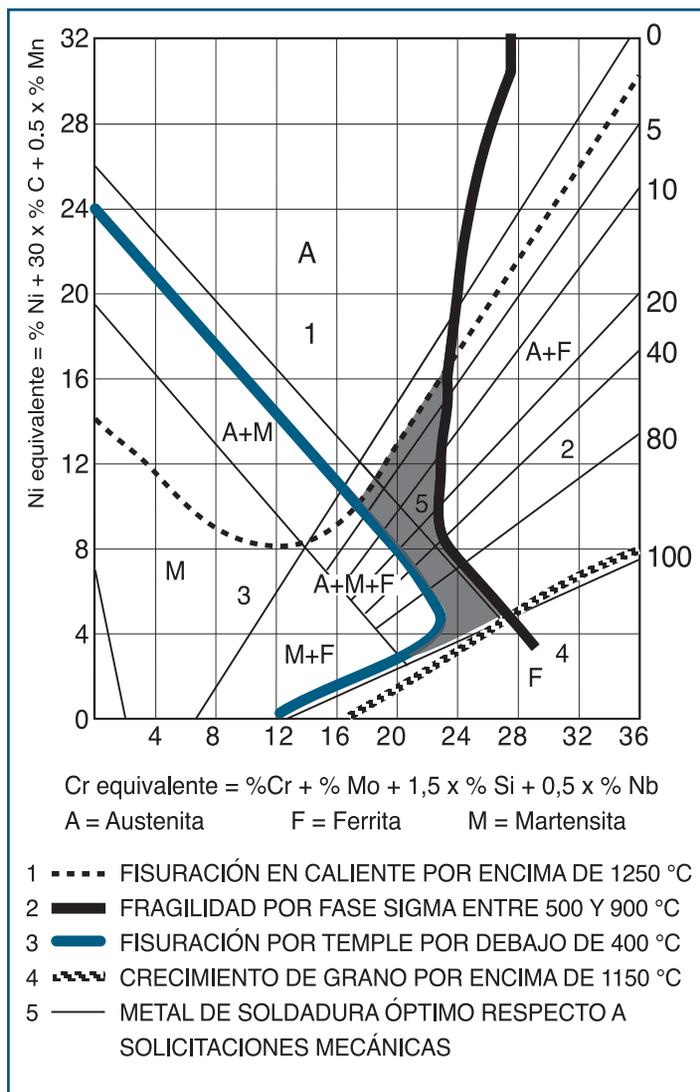


Figura 17. Zonas críticas diagrama Schaeffler

Para determinar el punto del gráfico que representa al metal depositado se procede de la siguiente manera:

1.- A partir de las ecuaciones adjuntas, se calcula el Cromo y el Níquel equivalente de cada uno de los metales base y se posiciona cada uno de ellos en el diagrama. Si soldamos un acero Austenítico con uno Martensítico se podrían tener los puntos 1 y 2. En el caso de aceros al carbono se debe considerar la descarburación que se produce durante la soldadura, la cual alcanza valores próximos al 50%, luego en la formula del Ni equivalente debe reemplazarse el termino $30x \%C$ por $15x \%C$. (Ver Fig. 24).

Cromo Equivalente:

$$\%Cr + \%Mo + 1,5x \% Si + 0,5x \% Nb$$

Níquel Equivalente:

$$\% Ni + 30 x \% C + 0,5x \% Mn$$

2.- El punto del gráfico que representa la composición química de la mezcla de los dos metales base, se encontrará en la recta que une los puntos 1 y 2 independientemente del porcentaje de dilución de cada uno durante el proceso de soldadura. Si se dan las condiciones para que ambos materiales participen en similar proporción (igual espesor, igual bisel, arco simétricamente direccionado, igual precalentamiento de ambos materiales), el punto que representa la mezcla de ambos materiales se ubicara en el medio de dicha recta. Punto 3.

3.- Se calcula el Cromo y Níquel equivalente del metal de aporte y se ubica en el diagrama el punto que representa dicho metal. Punto 4.

4.- El punto del diagrama que representa la mezcla final de los 3 metales se ubicará en la recta que une el punto 3 y 4, mas cerca o lejos del material de aporte de acuerdo al porcentaje de dilución del material base, lo cual a su vez es función del proceso de soldadura y sus parámetros (intensidad de corriente, longitud de arco, etc.). Generalmente, para un proceso de soldadura con electrodo revestido (SMAW), se considera un porcentaje de dilución de 30% (% de participación del metal base). Luego el punto del diagrama que representa la mezcla final del cordón de soldadura (Punto 5) se encontrará más cerca del punto 4.

5.- Las propiedades mecánicas del metal depositado pueden estimarse de acuerdo a la ubicación del punto 5 en el diagrama de fase. Dicho punto idealmente debe evitar las 4 zonas críticas del Diagrama de Schaeffler, esto puede variar dependiendo de la aplicación específica de la unión soldada.

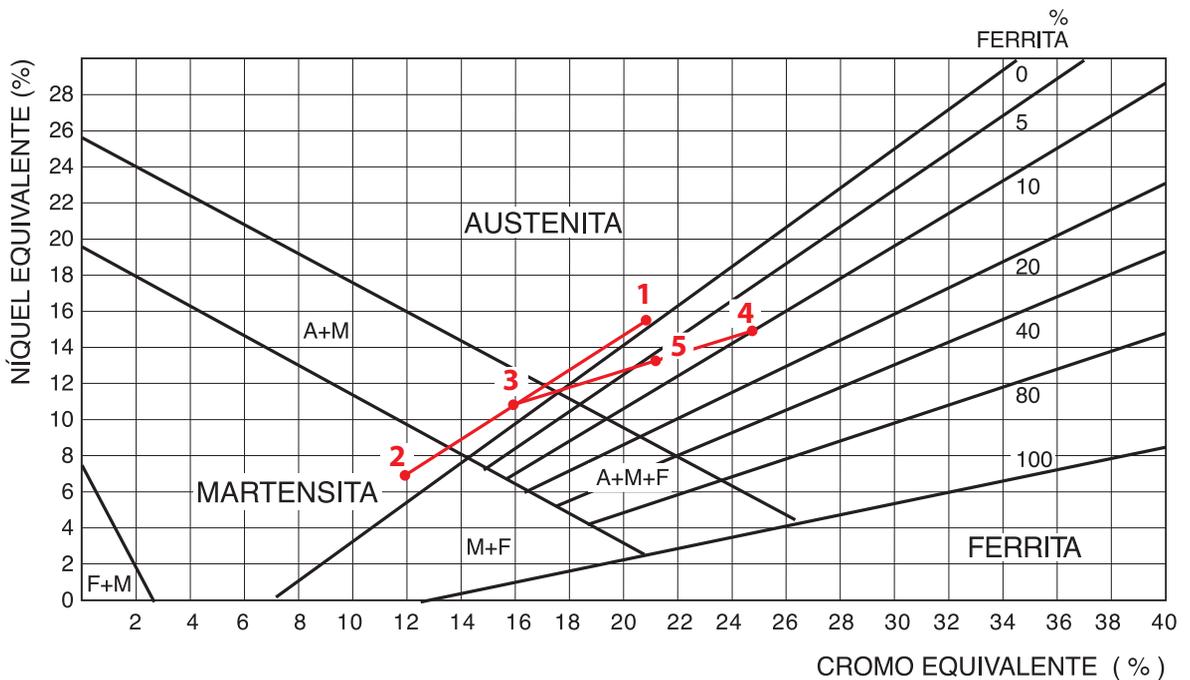


Figura 18. Diagrama de Schaeffler de ejemplo

SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES

Las propiedades de los aceros inoxidable difieren considerablemente de las de los aceros al carbono. Esto requiere una revisión detallada de sus características, fenómenos a los cuales están expuestos al someterlos a una fuente de calor y procesos de soldadura, para finalmente llegar a algunas recomendaciones prácticas que ayuden a soldadores e ingenieros de materiales a obtener soldaduras satisfactorias.

Como todas las soldaduras, los depósitos de acero inoxidable varían en calidad de acuerdo con la experiencia y calidad del soldador. Sin embargo no es posible permitir soldaduras de segunda calidad tratándose de aceros inoxidables, no solo por el alto costo de estas aleaciones sino que también porque la mayoría de las aplicaciones de los inoxidables son tan críticas que una soldadura de buena calidad es absolutamente esencial.

CALIDAD DEL METAL BASE Y DE APORTE

Los materiales base y metales de aporte deben cumplir con ciertos estándar de calidad especificados por normas tales como AWS, AISI, ASME y MIL-E-22200/2A. La utilización de materiales de baja calidad puede generar defectos que deberán repararse posteriormente o una vida útil reducida. Use solo Aceros Inoxidables de máxima calidad.

INSPECCIÓN DE SOLDADURAS

Las soldaduras de un Acero Inoxidable deberán ser ensayadas por Gammagrafía o ultrasonido para asegurar la calidad de la unión. Para obtener una buena radiografía la superficie de la soldadura debe estar libre de irregularidades. Debe removerse toda contaminación.

DISEÑO DE LA UNIÓN

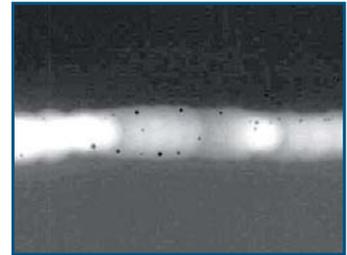
Una junta muy angosta dificulta el acceso del material de aporte y la remoción de escoria. Una junta muy ancha requiere mucho material de aporte lo cual aumenta el costo de la soldadura. Salvo indicación contraria y aplicaciones específicas, se recomienda mantener una separación de raíz igual al diámetro del electrodo y un ángulo de la unión de 60° para biseles en V.

FORMA DEL CORDÓN DE SOLDADURA

Se recomiendan cordones levemente convexos. Cordones cuya sección sea excesivamente convexa pueden ir acompañados de poca penetración e inclusiones. Las inclusiones de escoria pueden causar que la soldadura falle en el ensayo de doblado. Se recomiendan cordones con perfiles lisos para facilitar la remoción de escoria. El ancho del cordón no deberá ser de más de 2,5 veces el diámetro del electrodo.

HUMEDAD

La humedad en la soldadura puede producir porosidades. Tanto el electrodo como el metal base deben estar libres de humedad. La humedad presente en la soldadura depende de la exposición a fuentes de humedad y de la naturaleza higroscópica del revestimiento de los electrodos inoxidables. De acuerdo a lo anterior se recomienda especial atención con:



- Las principales fuentes de humedad son, agua utilizada para enfriar la soldadura, guantes húmedos, paños húmedos, humedad presente en el aire comprimido utilizado para soplar la escoria y condensación como consecuencia de variaciones de temperatura.
- Se debe considerar el bajo nivel de hidrogeno de los electrodos de acero inoxidable. No deben exponerse a ambientes de mas de 50% de humedad relativa por mas de 2 horas. Si así sucediera, deben ser reacondicionados en hornos a 300°C por al menos 1 hora.
- Dos síntomas que deben ponernos alerta sobre una probable humedad del revestimiento, es la dificultad en la remoción de escoria y la porosidad visible de la soldadura.
- Para prevenir la absorción de humedad del revestimiento, una vez abiertos los envases, se recomienda mantenerlos en ambientes calefaccionados a 100°C. En terreno, pueden almacenarse en termos portátiles.
- Si se sospecha que una unión no está completamente seca, soplar el agua con aire comprimido seco o calentar el área con un soplete para eliminar la humedad.

- La humedad excesiva en recubrimiento de electrodos inoxidables dúplex, presenta el riesgo adicional de originar fragilidad por hidrógeno en la fase ferrítica, lo cual no es un inconveniente en los grados austeníticos de la serie 300.
- Los electrodos mojados deben ser descartados, no reacondicionados.

LIMPIEZA Y PREPARACIÓN

Se debe poner especial cuidado en la preparación de la soldadura y considerar la limpieza previa, durante (entre cordones) y posterior al proceso de soldadura. Una limpieza inapropiada puede generar defectos en la soldadura tales como fisuras, porosidad, falta de fusión y pérdida de resistencia a la corrosión de la soldadura y de la zona afectada térmicamente. Algunas recomendaciones son:



- El área que debe ser limpiada incluye los bordes de la junta y 50 a 75 mm de la superficie adyacente.
- La superficies limpiadas deben ser cubiertas, a menos que se realice inmediatamente la soldadura.
- Las juntas a ser soldadas deben estar libres de óxidos superficiales que quedan frecuentemente después del corte por métodos térmicos. Estos óxidos está compuestos principalmente por compuestos de cromo y níquel, los cuales se funden a mayor temperatura que el metal base, y pueden quedar atrapados en el cordón de soldadura.
- En equipos que hayan estado en servicio en contacto con productos químicos, previo a la soldadura, se recomienda neutralizar residuos alcalinos con soluciones medianamente ácidas y residuos ácidos con soluciones medianamente alcalinas, seguido por un lavado con agua caliente.
- Limpie mediante esmerilado superficies que han estado en servicio expuestas a altas temperaturas. Estas requieren limpieza especial ya que pueden estar muy oxidadas, sulfurizadas o carburizadas.
- Se debe tener especial cuidado con las herramientas, barras de respaldo de cobre, pinturas ricas en zinc y desechos metálicos.
- Realice el desengrasado utilizando un solvente no clorado. No se recomiendan solventes clorados ya que restos de cloruro pueden permanecer en la superficie originando corrosión cuando la pieza entre en servicio.

- Contaminantes como azufre, fósforo y otros elementos de bajo punto de fusión pueden causar fisuras en el metal depositado. Contaminantes como carbono superficial no retirado antes de la soldadura pueden reducir la resistencia a la corrosión.
- Un tratamiento con ácido nítrico, seguido de una neutralización puede ayudar a eliminar metales de bajo punto de fusión.

- Para soldaduras multipasada, remueva la escoria entre cordones para evitar que esta quede atrapada y genere puntos de fragilidad. Una difícil remoción de escoria puede originarse por soldaduras irregulares, contaminantes en el material base, humedad en el revestimiento y juntas demasiado angostas. Todas las soldaduras deben enfriarse algo antes de comenzar a remover la escoria.

- Limpie el cordón una vez finalizada la soldadura. Si quedara algo de escoria sin remover después de proceso de soldadura, la zona cubierta no quedaría expuesta al aire y luego no desarrollaría la película protectora de óxido de cromo. Si la soldadura



- entra en servicio en presencia de un líquido corrosivo no oxidante, esta escoria podría ser removida dejando un área desprotegida que se corroerá rápidamente.
- Luego de soldar elimine los contaminantes orgánicos de la superficie. Estos favorecen la corrosión en ambientes agresivos. Además impiden que el decapado con ácido sea efectivo en remover la contaminación por hierro y óxidos superficiales.

- Utilice métodos de detección de incrustaciones de hierro, tales como mojar la superficie e inspeccionar después de 24 horas para detectar manchas de óxido. Una prueba más eficiente y sensible se puede realizar con una solución de 94% agua destilada, 3% ferrocianuro de potasio y 3% de ácido nítrico al 60-67% que se aplica con un rociador. Después de pocos minutos pueden aparecer manchas de color azul indicando la presencia de incrustaciones de hierro. Finalmente se debe limpiar la solución de la superficie con agua o un paño húmedo. Para mayor información ver Norma ASTM A380 "Standard Recommended Practice for Cleaning and Descaling Stainless Steel Parts".

- Después del desengrasado, utilice el decapado para eliminar las incrustaciones de hierro. Durante este proceso una capa superficial se elimina por corrosión frecuentemente con un baño de ácido nítrico / fluorhídrico a 50%. Dicho proceso se prefiere en los aceros inoxidable de bajo carbono o estabilizados. En grados no estabilizados, el proceso puede originar corrosión intergranular en la zona afectada por el calor.

- Quite toda la suciedad, grasa y materiales extraños por medio de limpiadores, desengrasantes, maquinado o esmerilado. Use solo cepillos de acero inoxidable.

- Algunas planchas inoxidables vienen protegidas con un papel fijado mediante adhesivos. Este debe quitarse por completo antes de soldar o el calor formará gases que causarán porosidades.

- Verifique la efectividad del desengrasado utilizando la prueba de la rotura de la película de agua. Una fina película de agua aplicada con una manguera, se interrumpirá en el área donde persista grasa, aceite u otro contaminante de este tipo.

PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA Y PARÁMETROS DE OPERACIÓN

- Los parámetros de operación como intensidad de corriente, voltaje y otros, deben ser los apropiados y deben estar especificados en el procedimiento de soldadura.



- Se debe utilizar los rangos de corriente recomendados por el fabricante. A falta de esta información y considerando la mayor resistencia eléctrica de los aceros inoxidables con respecto a los aceros comunes, se recomiendan rangos entre un 25% y 50% de los utilizados para un acero común.

- Para soldadura plana, mantener el electrodo con la parte superior inclinado en el sentido del avance unos 15°. Mantener el arco lo más corto posible.

- Para soldadura vertical, el electrodo debe mantenerse perpendicular a la plancha y usarse una leve oscilación en la pasada de raíz.

- Para soldadura sobre cabeza utilizar cordones rectos y cortos. Mantener el arco corto y evitar la oscilación.

- Con el objeto de obtener una soldadura con mejor resistencia a la corrosión, se recomienda utilizar la intensidad de corriente mínima y con cordones rectos. Lo anterior

minimiza el calor aportado y reduce la tendencia a la fisuración y a las deformaciones. Si es necesario usar cordones oscilados, deben limitarse a 2,5 veces el diámetro del electrodo.

- Una corriente demasiado baja producirá un arco inestable, interferencia de la escoria en el arco, pegado del electrodo, excesivo salpicado y una incorrecta forma del cordón.

- Un amperaje demasiado alto y/o un arco demasiado largo producirán salpicado excesivo, escaso control del baño de soldadura, fisuras, dificultad en la remoción de escoria y pérdida de resistencia a la corrosión por pérdida de cromo.

- Inicie el arco en un punto de la junta donde el metal se vuelva a fundir de modo de evitar potenciales grietas y áreas con menor resistencia a la corrosión. Otra alternativa es ocupar planchas adicionales al material base para dicho efecto.

- No interrumpir el arco dejando un cráter en la soldadura. Cuando el metal solidifica se formará una depresión rellena con escoria que será difícil de limpiar. Siempre se debe llenar los cráteres antes de cortar el arco.

- El excesivo calentamiento y los cráteres sin rellenar causan la mayoría de los problemas de grietas. Esto es especialmente importante en aceros inoxidables tipo 310 y 330, los cuales son completamente austeníticos y luego son susceptibles al agrietamiento en caliente.

- Evitar las socavaciones y remover toda la escoria (si es necesario con esmeril) antes de reiniciar la soldadura.

- Para soldadura TIG, y con el objeto de evitar la contaminación del metal base y del electrodo, utilice alta frecuencia para iniciar y el arco. En ausencia de estos dispositivos, utilice planchas auxiliares para dicho efecto.

- Para soldadura TIG, y con la finalidad de evitar la formación del cráter y potenciales grietas a partir de éste, el tamaño de la poza de soldadura debe ser disminuida antes que se inicie su solidificación. Para tal efecto utilice el pedal para disminuir la intensidad de la corriente antes de retirar el electrodo. En ausencia de este, aumente la velocidad de avance antes de levantar el electrodo. Antes de levantar el electrodo se debe mantener la pistola sobre el cráter por varios segundos para permitir que la soldadura solidifique bajo la protección de la atmósfera de argón.

- Para soldadura MIG, utilice polaridad invertida (corriente continua, electrodo positivo). Esta da una mayor penetración y un arco más estable.

CORROSIÓN

- Prevenga la formación de rendijas. En servicio corrosivo, cualquier rendija resultante por una falta de penetración, es un sitio potencial de desarrollo de corrosión.
- Ponga especial atención a la penetración de la junta soldada. El baño de soldadura del acero inoxidable es menos fluido que el del acero al carbono, así su penetración es menor. Las uniones de acero inoxidable deben tener un espacio mayor para el cordón de raíz.
- Las soldaduras de filete necesitan tener penetración completa, se deben soldar ambos lados y las puntas. Así se evitan rendijas que puedan juntar líquidos y originar corrosión.
- Elimine mediante pulido con abrasivos de grano fino imperfecciones, que son potenciales fuentes de corrosión como marcas de inicio y fin de arco.
- Proteja de la salpicadura las zonas anexas al cordón de soldadura. Se recomienda la aplicación de pasta, la cual debe ser removida en el proceso de limpieza posterior a la soldadura.
- Elimine la escoria mediante cepillo, pulido o con materiales libres de acero al carbono.

MATERIAL DE RESPALDO

- Se recomienda utilizar materiales de respaldo, salvo que la soldadura se realice por ambos lados de la superficie. La ausencia de éste puede generar en el lado opuesto de la superficie soldada, penetración excesiva, superficies irregulares y originar corrosión acelerada.
- Considere las alternativas de diseño de barras de respaldo de cobre para uso con y sin gas de respaldo.
- Prevenga la fusión del cobre de la barra de respaldo para evitar su incorporación al metal depositado.
- Se recomienda decapar después de soldar para eliminar posibles trazas de cobre.

MONTAJE DE LA SOLDADURA

- Realice un alineamiento adecuado de las piezas a soldar.
- Si una de las superficies a ser unida es considerablemente más gruesa, considerar la alternativa de rebajarla, para reducir la concentración de tensiones.
- Cuando los volúmenes a soldar son grandes, evaluar el diseño de posicionadores de acero inoxidable para mantener las superficies juntas durante el proceso de soldadura. Algunas de sus ventajas son: mejor ajuste de las juntas, menor distorsión, mejores tolerancias de fabricación y menor tiempo de soldadura.
- Las juntas sin posicionadores deberán ser punteadas para mantener la alineación. Para evitar desalineamiento durante el proceso de ensamblado de planchas, la secuencia debe comenzar con un punto en cada extremo de la plancha y luego uno en el medio. La secuencia continúa con puntos de soldadura en el medio de cada tramo resultante.
- Debido a la mayor expansión térmica del acero inoxidable, los puntos de soldadura deberán estar más juntos que lo que usualmente se utiliza para aceros al carbono.
- Las puntos de soldadura deberán ser limpiados con cepillo o esmerilados. Se recomienda proceso TIG para realizar el ensamblado.
- Para soldadura de cañerías se recomienda purgar el interior del con un gas inerte antes de la pasada de raíz con TIG. La falta de purga puede generar una superficie interior muy oxidada con una menor resistencia a la corrosión. Después de la soldadura de raíz, se recomienda mantener la purga por las dos siguientes pasadas, especialmente cuando no sea práctico el decapado después de la soldadura.

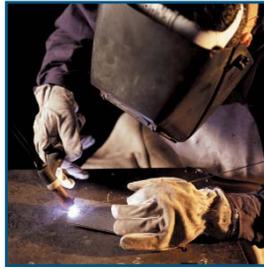
SISTEMAS Y EQUIPOS

Los aceros inoxidables se pueden soldar por la mayoría de los procesos comerciales de soldadura. Algunos de ellos pueden ofrecer ventajas adicionales a las proporcionadas con los procesos tradicionales, Arco Manual, MIG y TIG.

- Soldadura por MIG Tubular. Produce soldaduras de alta calidad, con mayor eficiencia que la soldadura por arco manual. Presentan mayor versatilidad en cuanto a composiciones especiales y rangos de Ferrita que la producida con alambre sólido en MIG.
- Soldadura por Arco Sumergido. Se usa extensamente para soldar espesores sobre 6.0 mm.
- Soldadura oxiacetilénica. No se recomienda para aceros inoxidables. Puede disminuir la resistencia a la corrosión de la soldadura y del área adyacente.

EQUIPAMIENTO TIG

Los equipos utilizados en la soldadura de los aceros inoxidables inciden considerablemente en la obtención de soldaduras sanas.



Algunas recomendaciones son:

- Lo estándar es usar corriente continua y electrodo negativo (polaridad directa). Para soldar materiales delgados y soldadura de raíz en soldadura de cañería considere la alternativa adicional de usar equipos con corriente pulsada.
- Utilice el dispositivo de encendido de alta frecuencia con el que cuenta su fuente de poder. Lo anterior permite iniciar el arco sin la necesidad de tener que tocar la superficie, así se previene la contaminación del electrodo de tungsteno.
- Se recomienda contar con un dispositivo de pedal que permita variar la intensidad de la corriente para ajustarse a las condiciones particulares de la soldadura y además permite el apagado del arco reduciendo la intensidad de la corriente.
- Considere la utilización de pistolas refrigeradas por agua para rangos de corrientes elevados.
- Para el afilado del electrodo de tungsteno, considere un ángulo entre 20°-25° con el extremo despuntado a 0.25 mm. de diámetro.

GAS DE PROTECCIÓN

La selección de gas de protección adecuado es un factor importante en la obtención de soldaduras sin defectos de fabricación.



Considere lo siguiente:

- Para soldadura MIG, utilice gases inertes como argón, helio o mezcla de ambos. Para obtener mejor acción del arco y una mejor fluidez del baño de soldadura, se pueden utilizar adiciones de pequeñas cantidades de gases activos como dióxido de carbono, oxígeno o hidrógeno. Para transferencia tipo spray, se recomienda utilizar argón con 1% o 2% de oxígeno. para transferencia cortocircuito y pulsado, se recomienda una mezcla 90% helio, 7.5% argón y 2.5% CO₂. El gas de protección debe contener al menos un 97.5% de gases inertes y el dióxido de carbono (CO₂) no debe exceder 2.5% o la calidad de la soldadura y la resistencia a la corrosión pueden verse disminuidas. El gas de protección INDURA más usado para aceros inoxidables, Indurmig O-2 contiene un 98% de argón y un 2% de oxígeno.
- Para soldadura TIG, utilizar como gas de protección argón, helio, o mezcla de ambos. También se usa mezcla argón – hidrógeno en los la soldadura de inoxidables Austeníticos. Los gases de protección INDURA son: Indurtig que contiene un 100% de argón y el Indurtig Inox, que contiene un 98% de argón y un 2% de hidrógeno. Las mezclas con oxígeno que se usan en el sistema MIG, no deben utilizarse debido al deterioro del electrodo de tungsteno. Las adiciones de nitrógeno no se recomiendan por la misma razón.

SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS

Aunque la serie 300 de aceros inoxidable austeníticos se sueldan con más facilidad que la serie 400 (martensíticos o ferríticos), existen diversos factores que deben considerarse para obtener soldaduras satisfactorias.

Cuando se comparan con el acero al carbono sin alear, de baja aleación o con la serie 400, los grados austeníticos tienen puntos de fusión más bajos, mayor resistencia eléctrica, coeficientes de conductividad térmica menores, y coeficientes de expansión de mayores. Por estas razones se requiere menos calor para la fusión.

La conductividad térmica menor, da como consecuencia una tendencia mayor de que el calor se concentre en una zona pequeña adyacente a la soldadura, aumente el gradiente de temperatura y las tensiones residuales. La característica de expansión térmica mayor puede resultar en la deformación o distorsión especialmente en perfiles delgados, lo que sugiere una mayor necesidad de poner guías para mantener el control dimensional. Ejemplos como los anteriores, sumado a características Metalúrgicas propias de los grados Austeníticos, hace recomendable revisar los fenómenos presentes en la soldadura de estos aceros y las formas de prevenirlos.

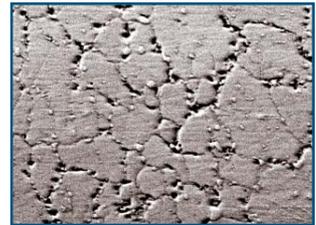
FENOMENOS A CONSIDERAR EN LA SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS

a) Precipitación de carburos

Es la causa más común de corrosión en el área de soldadura. Se produce preferentemente en los aceros inoxidable austeníticos y típicamente en las zonas del metal base adyacente al cordón de soldadura. Usualmente, la soldadura en si no resulta afectada. Cuando a los aceros inoxidable se les somete a temperaturas comprendidas entre los 450°C y 900°C durante un tiempo suficiente, o cuando se les enfría lentamente en dicho intervalo de temperatura, se origina en ellos una precipitación, fundamentalmente de carburos de hierro y cromo. Está precipitación es más intensa en el intervalo de los 600°C a los 850°C. Generalmente, estos carburos precipitan en las uniones de grano, disminuyendo la cohesión de los mismos y generando que las zonas anexas queden empobrecidas en cromo, con lo cual pierden su característica de inoxidable en dichas zonas, y por consiguiente su resistencia a la corrosión. Se dice entonces que la aleación está sensibilizada a la corrosión (se ha formado una red de carburos de cromo en los límites de grano). Luego, en ciertos medios corrosivos, se puede producir un ataque intergranular de la aleación, cuya intensidad dependerá de

la temperatura a la cual ha estado expuesta, del tiempo transcurrido, de la composición química y del tratamiento previo al cual ha sido sometida. La tendencia a la precipitación de carburos variará entonces con el tiempo de exposición a la temperatura crítica y con la composición de la aleación, especialmente la cantidad de carbono.

Por ejemplo, una aleación 304 de un contenido de carbono conocido, se sensibiliza cuando se somete a una temperatura alta durante el tiempo suficiente. Así, una aleación 304 con 0.062% de carbono podría quedar sensibilizada en aproximadamente 3 minutos si se mantiene a 700°C. En contraposición, una aleación con 0.03% de carbono podría mantenerse a 600°C por unas 8 horas antes de sensibilizarse. Por esta razón, comúnmente se utilizan grados bajos en carbono en aplicaciones donde la corrosión Intergranular es un riesgo. Con un grado "L" (Low Carbon), generalmente la zona afectada por el calor no se expone a la temperatura crítica el tiempo suficiente para sensibilizarse.



Cabe destacar que si bien en aceros inoxidable tipo 18/8 es importante mantener bajo los porcentajes de carbono, existen otros grados de la serie 300 que tienen cantidades significativamente más altas de carbono y cromo. Estos incluyen los metales 309, 310 y 312 que se encuentran generalmente en piezas fundidas. En estos casos el contenido de carbono mejora las propiedades mecánicas a altas temperaturas y el mayor contenido de cromo mejora la resistencia a la formación de escamas (scalling) a temperaturas elevadas. Los tipos 309H y 310HC en versiones de fundición con carbono entre 0,25% y 0,45% encuentran muchas aplicaciones en tuberías para uso en hornos de cemento, componentes de hornos, etc.

Recomendaciones para minimizar la precipitación de carburos:

- Limite el nivel de carbono al 0,03% o menos en los metales base y en los electrodos, lo cual, para prácticas normales, es suficientemente bajo para minimizar la formación del carburo de cromo. Los aceros inoxidable con niveles máximos de carbono 0,03% son conocidos como tipo ELC (Carbono Extra Bajo) o tipo L (Bajo).
- Utilice electrodos con elementos estabilizadores tales como Titanio (Ti) o Niobio (Nb), también llamado Columbio (Cb). Estos dos elementos se combinan preferentemente

con el carbono para formar carburos de Titanio y Niobio. La formación de estos carburos no afecta la resistencia a la corrosión y minimiza el carbono disponible para formar potenciales carburos de cromo, dejando al cromo libre para realizar su función inoxidable.

- Lo anterior se explica, si se considera que a 1050°C, la Austenita disuelve los carburos de Cr, Ti y Nb. Si comenzamos a enfriar un acero austenítico a partir de dicha temperatura, la formación de los carburos de Nb y Ti comenzará a partir de los 900°C aproximadamente y la de los carburos de Cr a temperaturas inferiores a 800°C. Luego, si enfriamos suficientemente lento dentro del rango de temperatura de formación de carburos de Nb y Ti permitiendo su precipitación, cuando el acero llegue al rango de precipitación de carburos de cromo, este último no encontrará suficiente carbono disponible para precipitar junto con él, quedando el cromo libre para cumplir su función inoxidable. Los grados estabilizados se prefieren para aplicaciones donde la aleación estará expuesta un largo tiempo al rango de temperatura de sensibilización. Los metales estabilizados son conocidos como tipos 347(Nb) y 321(Ti). Cabe destacar que en general los grados L tienen menor resistencia que los grados estabilizados y que a su vez estos últimos tienen mayor resistencia a altas temperaturas.

- Realice un templado por disolución. Disuelva los carburos de cromo mediante un calentamiento sobre 1050°C, seguido de un enfriamiento rápido de retención de fase para evitar la precipitación de carburos. Éste es un buen método para restaurar completamente la resistencia a la corrosión, cuando el tamaño, forma y geometría de la soldadura permiten el tratamiento térmico. Esta solución es aplicable a aceros que posteriormente no estarán sometidos a temperaturas de servicio dentro del rango sensibilización (420-850°C) y está restringida a piezas que por sus dimensiones y espesores sean factibles de ser templadas en hornos. Una práctica usada en trabajos de fundición, es calentar toda la soldadura hasta los 1150°C y luego enfriar rápidamente en agua, pasando así rápidamente por el rango de temperaturas crítico. Usar temperaturas interpose en los valores mínimos prácticos, en especial cuando se trata de soldadura de grados no estabilizados o sin bajo carbono como el tipo 304. Se recomiendan temperaturas de interpose menores a 180°C.

- Disminuya el aporte térmico en el proceso de soldadura. Lo anterior permite un relativo control sobre la precipitación de carburos. Para ello se recomienda usar baja intensidad de corriente, electrodos de menor diámetro, cordones cortos, y enfriar después de cada pasada reduciendo el tiempo en

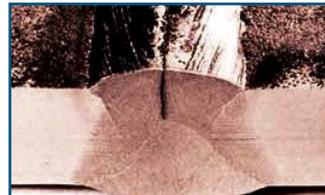
que la zona afectada térmicamente (ZAT) queda expuesta al rango de temperatura de sensibilización (426°C a 871°C). Para los grados no estabilizados o sin bajo en carbono, tales como AISI 304, es importante limitar la entrada de calor a valores bajo 35 kilojoules por centímetro para minimizar el ataque corrosivo en ambientes agresivos. Para calcular el aporte de en kilojoules por centímetro calor usar la fórmula, con la velocidad de avance en centímetros por minuto.

$$\frac{\text{Volts} \times \text{Amperes} \times 60}{\text{Velocidad} \times 1000}$$

Aporte térmico en soldadura

b) Fisuración en caliente

El agrietamiento en caliente corresponde a la aparición de fisuras distribuidas en el material soldado durante la etapa de enfriamiento, cuando este se encuentra aun a alta temperatura (1000°C). Dichas fisuras frecuentemente no alcanzan la superficie, pero quedan en evidencia en un ensayo de doblado.



El origen de dicho fenómeno se atribuye a la fractura de una película intergranular de bajo punto de fusión (1100°C a 1200°C) cuando esta queda atrapada en un acero austenítico que se enfría desde su temperatura de fusión (1420°C-1450°C). El menor punto de fusión de dicha película, origina que ésta quede atrapada en forma líquida en la estructura ya sólida y solidifique posteriormente generando tensiones de tracción en dicho proceso cuando hay restricciones a la contracción. La presencia de impurezas de bajo punto de fusión como Fósforo, Azufre y Silicio favorecen la ocurrencia de dicho fenómeno.

Una soldadura completamente austenítica es más susceptible a micro fisuras que una soldadura con algo de Ferrita. Está comprobado que pequeñas cantidades de Ferrita (2-3%) en aceros Austeníticos disminuyen el riesgo de ocurrencia de este fenómeno, al disminuir la concentración de impurezas en los bordes de grano. Además, la Ferrita disuelve más fácilmente que la Austenita las impurezas. La mayor ductilidad de la Ferrita en comparación con la Austenita, le permite compensar la contracción deformándose plásticamente y evitando la Fisuración en caliente.

En ausencia de Ferrita en la soldadura, se debe controlar en el metal de aporte elementos tales como silicio, fósforo y azufre para prevenir fisuras

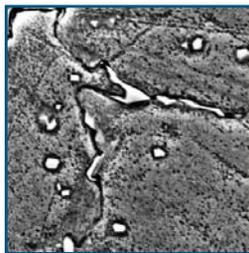
Las fases de soldadura e inspección requieren mayor atención al soldar con metales de aporte austenítico tales como 310, 320 y 330 (o con grados de baja Ferrita) debido a que son más sensibles al agrietamiento que los grados fortificados con Ferrita.

Recomendaciones para minimizar la fisuración en caliente:

- Debido a que el metal de aporte con alto contenido de silicio es más susceptible al agrietamiento, el contenido de silicio del metal de aporte debe controlarse.
- Los procedimientos y prácticas de soldadura deberían minimizar el embriado.
- Utilizar bajo aporte térmico durante el proceso de soldadura. Mantenga la temperatura de interpase por debajo de 100 – 180°C.
- Los cordones angostos reducen las tensiones de contracción.
- Rellenar y eliminar las grietas de los cráteres, antes de continuar la soldadura. Rellene los cráteres manteniendo un arco corto. Limpie cada cordón cuidadosamente antes de soldar sobre él.
- El precalentamiento de la zona afectada térmicamente, puede aumentar las fisuras considerablemente.

c) Formación de fase sigma

La fase sigma es un compuesto inter metálico de hierro y cromo, su composición es alrededor de un 45%Cr – 55%Fe. Se caracteriza por una alta dureza, superior a 900 Vickers y una gran fragilidad. Su influencia es notable en características mecánicas, resistencia a la corrosión y en las propiedades de la soldadura.



Una de las razones de la formación de fase sigma en los aceros inoxidable es la presencia de Ferrita. Si se les mantiene durante un largo periodo a temperaturas comprendidas entre los 550 y 900°C, la Ferrita se transforma en la Fase Sigma.

La Fase Sigma no sólo se origina en aceros de alto cromo, si no que también puede formarse en aceros Ferríticos con contenidos de cromo desde 14%, en aceros Austeníticos y Austeno-Ferríticos especialmente en presencia de una fase alfa rica en cromo. Los elementos aleantes modifican la velocidad y la temperatura de formación de fase Sigma. Elementos como Silicio, Molibdeno y Titanio, al favorecer la formación de fase alfa, favorecen la formación de Fase Sigma.

En resumen, la Fase Sigma es perjudicial en la mayoría de los casos. Disminuye la ductilidad, aumenta los riesgos de fisuración y disminuye la resistencia a la corrosión. Con un tratamiento térmico, se puede disolver en la Austenita, transformándola de nuevo en Ferrita. Una vez formada, la fase Sigma puede ser removida con un calentamiento de redisolución a 1050°C.

Recomendaciones para minimizar la formación de fase sigma

Limitar los contenidos de Ferrita a valores próximos al 12%, en piezas que serán sometidas a calentamientos en el rango 550-950°C, en servicio o durante el proceso de fabricación.

d) Fisuración inducida por hidrógeno

Los aceros inoxidable austeníticos no son susceptibles a la fisuración inducida por hidrógeno, (Hydrogen Induced Cracks, HIC) debido a la alta plasticidad de la estructura cúbica centrada en las caras. Sólo cuando están deformados plásticamente en frío o se unen con aceros ferríticos en juntas soldadas disímiles, puede presentarse HIC. Al contrario, en los aceros inoxidable ferríticos, el hidrógeno reduce considerablemente la ductilidad de su estructura pudiendo originar un tipo de fractura frágil.

RECOMENDACIONES PRÁCTICAS EN SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS

PRECALENTAMIENTO

En general, no se obtienen beneficios con el precalentamiento de la soldadura de estos aceros austeníticos, sino más bien un deterioro de la resistencia a la Corrosión Intergranular como consecuencia de la precipitación de carburos de cromo. Además el precalentamiento, aumenta el riesgo de fisuración en caliente y a la distorsión debido al mayor coeficiente de dilatación con respecto a un acero Ferrítico, por lo que no se recomienda.

SELECCIÓN DE ELECTRODOS

Los metales de aporte deberían ser compatibles con el metal base y proporcionar depósitos resistentes al agrietamiento que sean iguales o mejores que el metal base en términos de resistencia a la corrosión, resistencia mecánica y tenacidad. Debido a que el metal de aporte con composición equivalente al metal base no suele satisfacer dichos requerimientos, es una práctica común enriquecer el contenido de aleación del metal de base. Por ejemplo, el metal de aporte E316-16 con rangos de Cr (17-20%) y Ni (11-14%) para soldar acero AISI 316 con rangos de Cr (16-18%) y Ni (10-14%).

PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA Y PARÁMETROS DE OPERACIÓN

Durante la soldadura de los aceros inoxidable austeníticos, es una práctica frecuente, mantener la temperatura del material base lo más baja posible. Para ello pueden usarse diversas técnicas combinadas como, usar baja intensidad de corriente, un arco corto, cordones cortos y pausas entre cordones. Se recomienda mantener la temperatura a valores donde el material base pueda tocarse con la mano (70°C aproximadamente).

APLICACIONES CRIOGÉNICAS

Las propiedades criogénicas del metal de aporte austenítico depositado por electrodos recubiertos varía ampliamente de grado en grado. Para un grado específico se pueden obtener las propiedades óptimas si el metal de aporte es:

- Bajo en Ferrita → 0 FN
- Bajo en nitrógeno → menos de 0.05%
- Bajo en carbono → menos de 0.04%



TRATAMIENTO TÉRMICO

Los aceros inoxidable austeníticos son suministrados normalmente en condición de templados por disolución. En dicho proceso, la aleación se calienta a una alta temperatura (1040 °C a 1175 °C) dependiendo del tipo de aleación, y es enfriada rápidamente, usualmente en agua. A la temperatura de temple, los carburos de cromo se diluyen y pasan a solución sólida, como carbono y cromo.

Como resultado de las operaciones de formado y soldadura, se pueden desarrollar altas tensiones residuales. Cuando las soldaduras se templan por disolución y se enfrían rápidamente, normalmente se introducen nuevas tensiones residuales. Estas tensiones pueden causar movimientos después del maquinado. En los aceros comunes, es normal el alivio de tensiones por tratamiento térmico, pero es mejor evitar este tipo de tratamientos en las soldaduras de aceros inoxidable. Cuando lo sea, hay disponibles dos alternativas:

- Utilizar un tratamiento de alivio de tensiones a baja temperatura (315 °C a 425 °C), manteniéndolo por 4 horas por cada pulgada de espesor, seguido por un enfriamiento lento. Esto elimina solamente los picos de tensiones. El tratamiento es seguro para ser usado con los grados estándar tales como 304 y 316, lo mismo que con los grados estabilizados y con bajo carbono, dado que la temperatura es menor que la necesaria para que se formen carburos de cromo.
- Si el tratamiento a temperatura de 315 °C a 425 °C es inadecuado en reducir las tensiones al nivel deseado, puede requerirse un tratamiento de alivio de tensiones en el rango de 425 °C a 925 °C. A mayor temperatura y tiempos más prolongados, más completa será la eliminación de tensiones. Sin embargo, los grados estándar tales como 304 y 316 no pueden ser calentados en este rango sin sacrificar la resistencia a la corrosión como resultado de la precipitación de carburos. Cuando se requiera un tratamiento térmico de alivio de tensiones en este rango de temperatura, se deberá utilizar un grado estabilizado (321, 347) o uno con bajo contenido de carbono (304L, 316L, etc.).

SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS

La soldabilidad de los aceros inoxidable ferríticos generalmente es mejor que la de los martensíticos pero más difícil que la de los grados austeníticos. La exposición a altas temperaturas, como en la zona afectada por el calor, causa una reducción en la ductilidad y la dureza, junto con crecimiento de grano. El temple por disolución para prevenir la corrosión intergranular se hace a 790°C para los inoxidable ferríticos, en lugar de 1040°C a 1065°C para los austeníticos. Hay una mayor necesidad de precalentamiento y tratamiento térmico posterior, cuando aumentan los espesores a soldar.

FENÓMENOS A CONSIDERAR EN LA SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS

a) Excesivo crecimiento de grano

Los aceros Ferríticos son susceptibles al crecimiento de grano (850° a 900°C) por la falta de la recristalización del cambio de Ferrita a Austenita. El grano grueso tiene menos ductilidad y tenacidad que el grano fino. Una forma de afinar el grano es realizar un tratamiento térmico de recristalización con deformación plástica previa. Lo anterior es aplicable a productos semi-elaborados. En el caso de la soldadura, esto no puede realizarse y por ello en materiales donde la soldadura es parte del proceso de fabricación el crecimiento de grano puede ser un problema. Si las piezas a soldar son de dimensiones considerables, con el objeto de minimizar este problema, se recomienda post-calentar las piezas entre 700°C a 850°C.

a) Sensibilización

Los aceros inoxidable Ferríticos, por estar cerca del campo Gamma pueden no ser totalmente Ferríticos generando en el calentamiento sobre 900°C algo de Austenita en el borde de grano ferrítico. Si posteriormente, se les enfría rápidamente, la Austenita formada se transformará en Martensita disminuyendo la plasticidad y la resistencia a la corrosión de borde de grano. Por ello, para mejorar la resistencia a la corrosión de estos aceros se les debe enfriar lentamente (al contrario de los austeníticos) desde una temperatura de aproximadamente 1000°C.

b) Formación de Fase Sigma (550°C y 900°C)

Su presencia disminuye la tenacidad de un acero ferrítico. Debido a que la fase sigma es mas rica en cromo que la Ferrita, su formación podría además afectar la resistencia a la corrosión debido a una disminución del cromo disuelto en la matriz. En aceros ferríticos con alto contenido de cromo (sobre 30% aproximadamente), puede originarse la

transformación de Ferrita a fase sigma si se les mantiene mucho tiempo a temperaturas entre 550°C y 900°C o cuando se les enfría lentamente en dicho rango de temperatura.

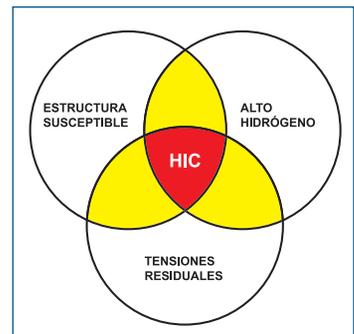
La fase sigma, puede ser re-disuelta mediante un calentamiento sobre por sobre 900°C y su formación evitada por un enfriamiento rápido que retenga la fase de alta temperatura (Ferrita alfa). Considerando que la formación de fase sigma es un proceso lento y las velocidades normales de enfriamiento en general no lo son, este fenómeno podría llegar a ser un problema si se requieren condiciones de servicio en el rango de temperatura de formación de dicho compuesto.

c) Fisuración inducida por hidrógeno

En aceros Ferríticos, el hidrógeno reduce considerablemente la ductilidad y tenacidad de la estructura y cambia el modo de fractura de dúctil a frágil. El agrietamiento por hidrógeno o Hidrogen Induced Cracking, HIC, es originado por hidrógeno que queda atrapado en el metal de soldadura una vez que este se enfría. Debido a su tamaño, el hidrógeno atómico puede difundir a través de la estructura de un acero y combinarse para formar hidrógeno molecular, generando altísimas presiones, suficientes para generar fisuras transgranulares en la soldadura o en la ZAT en estructuras que no sean suficientemente dúctiles. Estas pueden aparecer incluso algunas semanas posterior a la soldadura, a temperatura ambiente y no alcanzar la superficie de la pieza.

La tendencia a presentar HIC, se incrementa si se presentan simultáneamente las siguientes condiciones:

- Estructuras susceptibles al agrietamiento.
- Concentraciones altas de hidrógeno.
- Tensiones en la pieza soldada.



Algunas fuentes de hidrógeno son el agua, hidrocarburos, agregados de hidrógeno en gases de protección, grasa, pintura, humedad en revestimiento de electrodos, etc. El rápido enfriamiento de la soldadura promueve la fractura por hidrógeno, ya que el gas disuelto tiene menos tiempo para disiparse fuera de la soldadura antes de que ésta solidifique. El esfuerzo interno en la unión promueve la

fractura por hidrógeno. Los factores que inducen el esfuerzo son: la geometría de la unión, el grosor de las placas, el uso de elementos de sujeción y el aporte térmico. El acero al carbono y ciertos aceros de aleación tienen un mayor riesgo de fractura por hidrógeno. Esto se mide usando la escala de carbono equivalente que reúne la contribución del carbono junto con otros elementos de aleación. Aceros altos en carbono son más propensos a fracturas por hidrógeno.

La clave para comprender la HIC es el comportamiento respecto a la temperatura. A medida que la temperatura desciende desde la temperatura ambiente, también lo hace la difusión del hidrógeno atómico y por ende la conversión de este a hidrógeno molecular. Lo anterior minimiza la tendencia a la HIC. La HIC en aceros Ferríticos ocurre a temperaturas cercanas a temperatura ambiente.

A medida que la temperatura asciende desde la temperatura ambiente, la difusión del hidrógeno atómico aumenta, pero al aproximarse a temperaturas cercanas a 200°C, las posibilidades de formar moléculas de hidrógeno disminuyen. Lo anterior origina un aumento de la difusión de hidrógeno a través de la superficie, disminuyendo la tendencia al HIC.

Recomendaciones para prevenir el HIC son:

- Precalentar las piezas.
- Mantener el material base y electrodos secos y limpios.
- Usar procesos de bajo hidrógeno.
- Realizar un deshidrogenado previo a la soldadura en materiales que han estado en servicio en presencia de hidrógeno atómico, por ejemplo en la industria química.
- Hacer un envejecido de deshidrogenación por sobre 200°C inmediatamente después de la soldadura; sobretodo, si se sospecha de la introducción de hidrógeno durante la soldadura con el objeto de restaurar su ductilidad.
- Un rango típico de temperaturas de deshidrogenado varía entre 200°C y 250°C. Sobre 200°C, el hidrógeno se encuentra en estado atómico (condición necesaria para difundir hacia la superficie) con mínimas posibilidades de convertirse a hidrógeno molecular. Bajo 250°C, se previenen posibles problemas asociados a la reacción del hidrógeno atómico con carburos de hierro.

d) Precipitación de carburos

En algunos de los grados ferríticos convencionales el nitrógeno y el carbono residual pueden combinarse con el cromo para formar carburos y nitratos en los bordes de grano. Esto causa una reducción drástica del cromo y en algunos casos corrosión intergranular, aunque no al grado que se experimenta con los aceros inoxidable austeníticos.

e) Formación de Martensita

La soldadura de un acero Ferrítico, puede producir pequeñas cantidades de Austenita en las zonas afectadas por el calor, las cuales durante el enfriamiento podrían transformarse en martensita y así reducir la ductilidad, la tenacidad y la resistencia a la corrosión.

Es posible evitarlo con enfriamientos cortos y cuidadoso control del aporte calórico en el proceso de soldadura.

RECOMENDACIONES PRÁCTICAS EN LA SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS

PRECALENTAMIENTO

En general, durante el proceso de soldadura, se debe minimizar el aporte térmico y evitar el enfriamiento lento de la junta. Evitar el calentamiento prolongado de los aceros inoxidable ferríticos dentro del rango de 371°C – 927°C. Con el objeto de mejorar la ductilidad de la soldadura y de la ZAT, la cual puede contener algo de Martensita, se recomienda precalentar de 149°C - 232°C cuando el espesor a soldar excede aproximadamente 6 mm.

TRATAMIENTO TÉRMICO

El calentamiento post-soldadura de los aceros inoxidable ferríticos a 788°C hasta 843°C garantizará una estructura completamente ferrítica y restablecerá parcialmente las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión que puede haber sido afectada adversamente por las temperaturas de la soldadura. Sin embargo, la exposición dentro de este rango de temperatura producirá rápidamente fragilidad por formación de fase sigma en las aleaciones con alto contenido de cromo, tales como las 444. Para minimizar la distorsión, el enfriamiento puede realizarse en el horno a no menos de 593°C, pero debería evitarse la exposición prolongada en el rango de 566 - 399°C debido a la fragilidad de los 475°C.

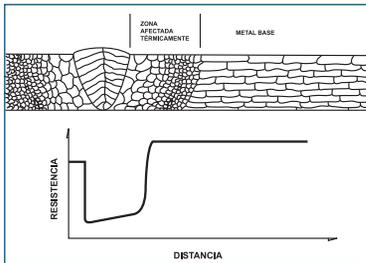
SELECCION DE MATERIAL DE APORTE

Suelen utilizarse metales de aporte austenítico como el 310 y 312 cuando la aplicación puede compatibilizar diferentes características de resistencia a la corrosión y coeficientes de expansión. Si se especifica un recocido post-soldadura dentro del rango crítico de formación de carburos de cromo, el metal de soldadura debe ser estabilizado o de bajo contenido de carbono.

SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS

FENÓMENOS A CONSIDERAR EN LA SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS

a) Tensiones internas y grietas



La alta templabilidad de estas aleaciones, origina que se produzca Martensita en el cordón de soldadura y en la ZAT. La Martensita, cuya dureza aumenta con el contenido de carbono, presenta una tendencia considerable a la fisuración. Los Aceros Inoxidables martensíticos son endurecidos al aire cuando se les enfría rápidamente desde el rango de temperatura de austenitizado ($871^{\circ}\text{C} - 1010^{\circ}\text{C}$). Dichas temperaturas se alcanzan en la ZAT y el enfriamiento posterior se realiza a velocidades suficientes para producir Martensita.

En la condición recocida, los aceros inoxidables martensíticos tienen básicamente una microestructura ferrítica con carburos de cromo dispersos. El carbono y el cromo en los aceros inoxidables martensíticos actúan en combinación para prevenir la transformación de Austenita en Ferrita durante el enfriamiento rápido. El resultado es una estructura BCT desordenada llamada martensita (cuerpo tetragonal centrado como BCC pero elongado en una dirección). La zona afectada térmicamente en una pieza soldada desarrollará la fase martensítica frágil, dura y, a menos que se realice precalentamiento local, puede desarrollar grietas debido a las tensiones de contracción y al hidrógeno.

La dureza de la zona afectada por el calor depende principalmente del contenido de carbono del metal base. La mayor dureza disminuye la tenacidad y aumenta la susceptibilidad al agrietamiento.

El precalentamiento del metal base retarda la tasa de enfriamiento, permitiendo que el metal de aporte y las zonas afectadas por el calor se enfríen a una tasa más lenta y uniforme, reduciendo las tensiones. La tasa de enfriamiento más lenta también permite que escape más hidrógeno.

RECOMENDACIONES PRÁCTICAS EN LA SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS

MATERIAL DE APORTE

Para aplicaciones generales, utilizar como material de aporte grados martensíticos como el 410 o 420 preferentemente con bajo contenido de carbono para evitar excesivo endurecimiento de la soldadura.

En aplicaciones que no requieran o no sea práctico realizar precalentamiento o tratamiento térmico post-soldadura y cuando se aceptan diferencias en la composición y en las propiedades físicas (tales como el coeficiente de expansión), se recomienda utilizar como material de aporte grados austeníticos tipo 309, 310 y 312 o similares. El cordón será más dúctil que las ZAT (dura y frágil); el metal depositado absorberá por fluencia las tensiones y deformaciones en las zonas cercanas al cordón y así evitará las grietas.

TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO E INTERFASE

La tendencia a la fisuración de los aceros inoxidables martensíticos puede ser disminuida mediante el precalentamiento y el tratamiento térmico post-soldadura. Para aplicaciones generales, se recomienda una temperatura de precalentamiento e interfase entre $200^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}$, aunque se debe considerar que las temperaturas más adecuadas dependerán del contenido de carbono del metal base, la composición del metal de aporte, la masa de la junta y el grado de restricción del conjunto soldado. Así por ejemplo para juntas soldadas donde participen espesores gruesos, o cuando se utilizan electrodos martensíticos pueden manejarse temperaturas de precalentamiento de hasta 350° o más. Si se usan aportes austeníticos los procedimientos de precalentamiento y post-calentamiento son menos exigentes.

TRATAMIENTO TÉRMICO POST SOLDADURA

Considerando que a pesar del precalentamiento y el control de la temperatura de interfase se produce algo de Martensita, frecuentemente se recomienda realizar un tratamiento térmico post-soldadura. Cuando es posible se recomienda realizarlo antes que la pieza soldada se enfríe. Para los resultados óptimos, no debería permitirse que la pieza soldada se enfríe por debajo de la temperatura de precalentamiento entre los pasos de la soldadura o antes del calentamiento post-soldadura. Un revenido del orden de $600 - 750^{\circ}\text{C}$ seguido de un enfriamiento controlado a tasas del orden de 30°C por hora hasta los 600°C reduce la dureza y aumenta la ductilidad y la resistencia a la corrosión. Como alternativa puede realizarse un recocido

entre 850°-900°C por dos horas y luego enfriarlos a tasas no mayores de 50°C por hora hasta los 600°C. Bajo 600°C se permiten enfriamientos más rápidos aunque se debe limitar a valores próximos a 200°C por hora por pulgada de espesor para evitar tensiones internas residuales.

La resistencia óptima a la corrosión de estos aceros se obtiene efectuando tratamientos térmicos de temple y revenido a las temperaturas requeridas; sin embargo esta resistencia no es tan buena como en los aceros austeníticos o ferríticos.

SOLDADURA DE METALES DISÍMILES

Los electrodos inoxidable han sido utilizados en soldadura de mantenimiento desde su primera aparición en el mercado. La apariencia pareja de los cordones obtenida en la unión de metales disímiles generaba confianza en el trabajo realizado. Las soldaduras casi nunca fallaban, pero se presentaban fallas en el metal adyacente a la soldadura y en la zona afectada térmicamente. Cuando se introdujeron los electrodos bajo hidrogeno en la Segunda Guerra Mundial, reemplazaron a los inoxidable en muchas aplicaciones, pero nunca han probado tener la versatilidad y seguridad que han hecho tan populares a los electrodos inoxidable austeníticos. Actualmente los electrodos inoxidable son muy bien aceptados en la mayoría de los talleres de mantenimiento.

TABLA DE SOLDADURA DISÍMILES

Electrodo	Resistencia a la tracción (Mpa)	Elongación (%)	Observaciones
INDURA 29-9S	754	32	Es el mejor electrodo de uso general para unión de metales disímiles de aproximadamente 700 Mpa o mas
INDURA 25-20	593	30	Usado para enmantear uniones de gran espesor o para relleno de uniones pequeñas o medianas, en aceros de unos 600 MPa o menos
INDURA 309L (E309L-16)	555	42	Es el mejor electrodo de uso general para aceros de 600 Mpa o menos. Posee mayor elongación que el tipo 310 y 312
INDURA 308 (E308-16)	590	53	Forma Martensita en la ZAT en la mayoría de los aceros al carbono y de baja aleación, a menos que se "enmantear" con el tipo 310 o 312. Es adecuado para la unión y reconstrucción de aceros al manganeso tipo HADFIELD
INDURA 309 MoL (E309MoL-16)	680	40	Para unir inoxidable con aceros de baja aleación en aplicaciones para corrosión y para soldaduras de primer paso para hacer capas superpuestas resistentes a la corrosión.

SELECCIÓN DE ELECTRODOS PARA LA UNIÓN DE METALES DISÍMILES

El uso de electrodos de acero dulce o de baja aleación de bajo hidrógeno para unir metales disímiles, de los cuales al menos uno es de alto carbono o altamente aleado, resulta generalmente en una zona frágil en el metal base adyacente a la soldadura. Una velocidad de enfriamiento rápida ocasionará que se forme Martensita, la cual es dura y frágil. El éxito de los electrodos inoxidable austeníticos en la unión de metales disímiles, consiste en su habilidad para formar una excelente unión con cualquier acero soldable y con corrientes mas bajas que las que requieren los electrodos de baja aleación. Así se obtiene una menor zona afectada por el calor y se reduce la dilución del metal de soldadura con el metal base, proporcionando así una unión que tendrá propiedades mecánicas óptimas. Para tener buena resistencia y ductilidad, el deposito de soldadura debe conservar cuando menos un 18% de cromo y un 8% de níquel. Usando un electrodo tipo E308 (20% de cromo y 10% de níquel) para soldar aceros al carbono o de baja aleación, probablemente dichos porcentajes bajaran debido a la dilución, esto dará como resultado perdida de ductilidad en la soldadura.

Electrodo INDURA 25-20

Por muchos años han sido la primera alternativa para soldadura de diversos aceros de composición desconocida. Es completamente austenítico y puede tolerar una dilución de aproximadamente 46% con acero dulce antes de convertirse en Martensita.

Electrodo INDURA 308 (E308)

Posee una relativamente pequeña capacidad de dilución antes de convertirse en Martensita y luego su confiabilidad para muchos metales disímiles es limitada. No se recomienda para soldar metales disímiles, excepto el acero al manganeso y soldaduras livianas que nunca serán sometidas a tensión. Ha sido usado con éxito en la fabricación y mantenimiento de acero al manganeso tipo "Hadfield". Posee revestimiento tipo bajo hidrógeno que previene las grietas en el cordón causadas por la fragilización originada por el hidrógeno.

Electrodo INDURA 309 (E309)

Posee una capacidad de dilución intermedia entre los tipos E308 y E310, luego también se consideran apropiados para soldadura de metales disímiles.

Electrodo INDURA 29-9S

En los últimos años se ha convertido probablemente en el líder para la unión de metales disímiles debido a su mayor resistencia a la tensión, la cual por si misma no es siempre una buena razón para usarlo.

RESISTENCIA A LA TENSIÓN V/S DUCTILIDAD

Una alta resistencia a la tensión no siempre es deseable. Al hacer uso de cualquier metal de relleno y al fabricar y reparar aceros de alta resistencia o desconocidos, es recomendable mantener la resistencia a la tracción aproximadamente al mismo nivel que del metal base y luego buscar la máxima ductilidad.

Las propiedades mecánicas se miden en probetas de metal depositado tomado de uniones soldadas en una plancha. No debe haber ningún factor de dilución involucrado. En la práctica, si ocurre dilución, tiende a elevar la resistencia a la tracción por encima de los valores obtenidos a partir de las probetas de tracción. Probablemente la elongación disminuirá con la dilución, luego el soldador deberá minimizar este efecto. Para aplicaciones generales, la mayor parte de las veces, la ductilidad es más conveniente que la resistencia a la tracción. Este hecho hace destacar que el 309 es el más valioso aliado en una amplia variedad de aplicaciones.

SOLDADURA DE REPARACIÓN DE PIEZAS DE GRAN SECCIÓN

Al hacer reparaciones por soldadura en piezas de gran sección una buena práctica es "enmantequillar" los lados de la unión con el tipo 310 y terminar la soldadura con el tipo 309. Al usar esta técnica el tipo 310 proporciona una capa austenítica y usando una entrada mínima de calor, se obtiene una mínima zona martensítica afectada por el calor en el metal base. El tipo 309 proporciona una resistencia a la tracción similar pero con una mejor elongación. El tipo 309 se puede utilizar en todo el trabajo con relativa seguridad.

El tipo 310 aunque es adecuado en soldadura de sección pequeña como por ejemplo el enmantequillado mencionado anteriormente, no es tan confiable como el tipo 309 en soldaduras de piezas de gran sección. Debido a que es totalmente austenítico esta sujeto a pequeñísimas fisuras y desgarraduras al enfriarse y, particularmente cuando está restringido, estas fisuras se unen y forman grietas visibles. Esta característica no se encuentra en los tipos 309 y 312 debido a su contenido de Ferrita.

ELECTRODOS

INDURA 308/308H

AWS: E 308/308H-16

Descripción: Electrodo de composición típica 19% Cr y 10% Ni. Altamente resistente contra la fragilidad por fase sigma. Fácil remoción de escoria y excelente presentación del cordón.

Usos: En general se recomienda para soldadura de metales base de composición similar. Para soldadura de aceros inoxidable que contienen 16-21% Cr, 8-13% Ni, y con altos contenidos de carbono, tipo 304H. Se utiliza en donde el acero inoxidable esta sometido a temperaturas de servicios inferiores a 750° C.

Aplicaciones típicas: Aceros tipo AISI 301, 302, 304 y 305.

Posiciones de soldadura: P, H, V, SC.

Tipo de corriente: CCEP, CA.

Composición química:

C: 0.05%	Mn: 0.54%
Si: 0.67%	P: 0.021%
S: 0.005%	Cr: 18.7%
Ni: 10.2%	Mo: 0.07%

Propiedades mecánicas:

Resistencia a la tracción 590 MPa
Elongación (L=4d) 53%

**INDURA 308 L**

AWS: E 308 L-16

Descripción: Tiene un revestimiento rutilico, lo que permite soldar con CA o CCEP, electrodo positivo. Arco estable de transferencia spray, depósito de excelente forma y apariencia. La escoria se desprende fácilmente, muy buena reanudación de arco. El depósito es de acero inoxidable austenítico.

Usos: Aceros inoxidable austenítico con un contenido extra bajo de carbono. El contenido de 0.04% de carbono, evita la formación y la precipitación de carburos. Excelente protección contra la corrosión intergranular. Se recomienda especialmente para aplicaciones resistentes a la corrosión, producida por los ácidos y soluciones de celulosa. Se recomienda su uso en soldaduras intermitentes.

Aplicaciones típicas: Aceros Inox. 304, 304L, 308, 308L, 321, 347, 348. Equipos químicos y petroquímicos. Estanques.

Posiciones de soldadura: P, H, V, SC.

Tipo de corriente: CCEP, CA.

Composición química:

C: 0.02%	Mn: 0.63%
Si: 0.76%	P: 0.025%
S: 0.008%	Cr: 18.7%
Ni: 10.0%	Mo: 0.18%

Propiedades mecánicas:

Resistencia a la tracción 590 MPa
Elongación (L=4d) 53%



* Fotografías referenciales.

INDURA 309 L

AWS: E 309 L-16

Descripción: Su bajo contenido de carbono previene la precipitación de carburos de cromo. Excelente contra la corrosión intergranular. Excelente operatividad en toda posición.

Usos: Adecuado para uniones de aceros inoxidable a aceros bajo carbono y baja aleación. Apto para enmantequillado (buttering) y como depósito base para aplicaciones que requieren un posterior recubrimiento duro. Su depósito tiene excelente resistencia a la corrosión a temperatura ambiente, pero primordialmente fue diseñado para resistir la oxidación a altas temperaturas (1000°C).

Aplicaciones típicas: Adecuado para aceros AISI 309, 309L, 309Cb, 304, 304L, 321, 347 y soldaduras disímiles.

Posiciones de soldadura: P, H, V, SC.

Tipo de corriente: CCEP, CA.

Composición química:

C: 0.02%	Mn: 0.69%
Si: 0.80%	P: 0.022%
S: 0.009%	Cr: 22.5%
Ni: 13.4%	Mo: 0.16%

Propiedades mecánicas:

Resistencia a la tracción 555 MPa
Elongación (L=4d) 42%

**INDURA 309MoL**

AWS: E 309 MoL-16

Descripción: Electrodo con revestimiento rutilico, para aceros inoxidable austeníticos. Su composición es igual al E-309Mo, excepto por el contenido de carbono reducido, el cual disminuye la posibilidad de corrosión intergranular y corrosión por pitting.

Usos: Ideal para uniones disímiles entre aceros inoxidable y aceros al carbono a de baja aleación. Para soldadura de aceros inoxidable que contienen Cr-Ni-Mo.

Aplicaciones típicas: Soldadura de metales disímiles. Unión de aceros AISI 309 MoL y para reparaciones de Clad Steel tipo AISI 316 y 316L.

Posiciones de soldadura: P, H, V, SC.

Tipo de corriente: CCEP, CA.

Composición química:

C: 0.02%	Mn: 0.73%
Si: 0.51%	P: 0.018%
S: 0.010%	Cr: 22.3%
Ni: 12.5%	Mo: 2.39%

Propiedades mecánicas:

Resistencia a la tracción 680 Mpa
Elongación (L=4d) 40%



* Fotografías referenciales.

INDURA 25-20

Descripción: Tiene revestimiento rutilico, lo que permite soldar con CA o CC, electrodo positivo. Arco estable de transferencia spray. Depósito de acero inoxidable austenítico con excelente forma y apariencia. La escoria se desprende fácilmente y una muy buena reanudación de arco. Se puede usar en forma intermitente. Excelente operatividad.

Usos: Está especialmente diseñado para soldar aceros inoxidables del tipo 310 y 314. Alta resistencia a la tracción y a la corrosión hasta temperaturas de 1.050° C. Para soldar aceros de composición desconocida y aceros disímiles.

Aplicaciones típicas: Rellenos de ejes. Aceros 310, 314, 310Cb. Componentes sometidos a temperatura. Soldadura de aceros disímiles.

Posiciones de soldadura: P, H, V, SC.

Tipo de corriente: CCEP, CA.

Composición química:

C: 0.13%	Mn: 1.25%
Si: 0.71%	P: 0.021%
S: 0.008%	Cr: 28.8%
Ni: 21.4%	Mo: 0.10%

Propiedades mecánicas:

Resistencia a la tracción 593 MPa
Elongación (L=4d) 30%

**INDURA 29-9S**

Descripción: Tiene revestimiento rutilico, lo que permite soldar con CA o CC, electrodo positivo. Arco estable de transferencia spray. Depósito de acero ferrítico austenítico. Su escoria que se desprende fácilmente, y una buena reanudación del arco, permite usarlo en soldaduras intermitentes.

Usos: Para aceros inoxidables de alta resistencia tipo 312 y para aceros de diferente composición en que uno es alto en níquel. El depósito es sumamente resistente a las fisuras y grietas debido a las dos fases Austenita-Ferrita. Sus aplicaciones deberían ser limitadas a temperaturas de servicio bajo 420°C para evitar la formación de fases frágiles.

Aplicaciones típicas: Reparación de ejes y engranajes. Rellenos de aceros templables. Aceros 312, 314, 303. Soldabilidad de aceros difíciles.

Posiciones de soldadura: P, H, V, SC.

Tipo de corriente: CCEP, CA.

Composición química:

C: 0.11%	Mn: 0.97%
Si: 0.69%	P: 0.028%
S: 0.009%	Cr: 29.0%
Ni: 10.1%	Mo: 0.23%

Propiedades mecánicas:

Resistencia a la tracción 754 MPa
Elongación (L=4d) 32%



* Fotografías referenciales.

INDURA 316 / 316H

AWS: E 316 / 316H 16

Descripción: Electrodo rutilico para aceros austenítico del tipo 19% Cr, 12% Ni y 2.5% Mo. El 316H es igual a 316 excepto que en el primero el contenido de carbono ha sido restringido al rango superior aceptado por el 316: entre 0,04% y el 0,08% de C. Lo anterior proporciona mayor resistencia a la tracción y al creep a altas temperaturas.

Usos: Para soldadura de aceros inoxidable que contienen 16-21% Cr, 10-15% Ni y 0-3% Mo, con alto contenido de carbono. Aceros tipo 316 y aleaciones similares. Son utilizados para aplicaciones sometidas a altas temperaturas de servicio (hasta 750° C aproximadamente).

Aplicaciones típicas: Equipos químicos y petroquímicos, industria lechera, etc.

Posiciones de soldadura: P, H, V, SC.

Tipo de corriente: CCEP, CA.

Composición química:

C: 0.05%	Mn: 1.20%
Si: 0.80%	P: 0.020%
S: 0.020%	Cr: 18.7%
Ni: 12.0%	Mo: 2.3%

Propiedades mecánicas:

Resistencia a la tracción 600 MPa
Elongación (L=4d) 35%

**INDURA 316 L**

AWS: E 316 L-16

Descripción: Arco suave y estable de transferencia spray. Depósito de excelente apariencia que se ajusta con facilidad a las exigencias del trabajo. La escoria se desprende fácilmente y como el arco es rápidamente restablecido, se usa en soldadura intermitente.

Usos: El 316L ha sido diseñado para aceros austeníticos con un contenido extra bajo de carbono. El contenido máximo de 0,04% de carbono, evita la formación y precipitación de carburos. Excelente protección contra la corrosión intergranular. Se recomienda especialmente para aplicaciones resistentes a la corrosión, cuando existen posibilidades de "picadura" (ataque por ácido). No es necesario tratamiento térmico posterior.

Aplicaciones típicas: Aceros 316, 316L, 317, 317L, 316Ti y 318.

Posiciones de soldadura: P, H, V, SC.

Tipo de corriente: CCEP, CA.

Composición química:

C: 0.02%	Mn: 0.63%
Si: 0.77%	P: 0.022%
S: 0.009%	Cr: 18.5%
Ni: 11.7%	Mo: 2.7%

Propiedades mecánicas:

Resistencia a la tracción 580 Mpa
Elongación (L=4d) 48%



* Fotografías referenciales.

INDURA 347

AWS: E 347-16

Descripción: Tiene revestimiento rutilico, lo que permite soldar con CA o CC, electrodo positivo. Arco con una transferencia de tipo spray muy estable. Depósito que fluye para producir soldaduras de forma y apariencia excelentes, se ajusta para permitir un buen control en soldadura fuera de posición. La escoria se desprende fácilmente.

Usos: El 347 ha sido diseñado para aceros tipo 347 y 321. Sin embargo, puede ser usado para soldar cualquier tipo de inoxidable en que se requiera una máxima resistencia a la corrosión. El niobio inhibe la precipitación de carburos, disminuyendo notablemente la corrosión.

Aplicaciones típicas: Aceros 347, 321, 304 y 308L. Componentes para ácidos, gases y agua.

Posiciones de soldadura: P, H, V, SC.

Tipo de corriente: CCEP, CA.

Composición química:

C: 0.03%	Mn: 0.76%
Si: 0.90%	P: 0.032%
S: 0.005%	Cr: 18.5%
Ni: 10.0%	Mo: 0.25%
Nb: 0.40%	

Propiedades mecánicas:

Resistencia a la tracción 650 Mpa
Elongación (L=4d) 39%

**INDURA 13/4**

AWS: E 410NiMo-1

Descripción: Electrodo similar al E410 salvo que contiene menos cromo y más níquel. El objetivo es eliminar la Ferrita, debido a los efectos mecánicos perjudiciales generados por esta fase. Proporciona mejor resistencia al agrietamiento que el metal de soldadura tipo 410 para la unión de metales base de este mismo tipo. Además es del tipo bajo hidrógeno, por lo cual se recomienda seguir todos los pasos correspondientes al presecado y mantenimiento de un electrodo bajo hidrógeno. El tratamiento térmico post soldadura no debería exceder los 620°C.

Usos: Muy apropiado para ruedas de turbinas tipo Pelton, Francis, Kaplan. Aceros 403, 405, 410, 410S, 414, 416, 420 y ASTM CAGNA.

Aplicaciones típicas: Reconstrucción de válvulas y fittings. Aceros martensíticos, inoxidables al cromo, fundidos al Cr Ni.

Posiciones de soldadura: P, H, V, SC.

Tipo de corriente: CCEP.

Composición química:

C: 0.04%	Mn: 0.48%
Si: 0.29%	P: 0.019%
S: 0.011	Cr: 11.5%
Ni: 4.1%	Mo: 0.48%

Propiedades mecánicas:

Tratamiento Térmico 610°C x 1 hora
Resistencia a la tracción 827 Mpa
Elongación (L=4d) 17%



* Fotografías referenciales.

INDURA 2209

AWS: E 2209-16

Descripción: Tiene una estructura dúplex consistente en una matriz Austenítica - Ferrítica. El metal depositado combina alta resistencia a la tracción con propiedades mejoradas de resistencia a la corrosión bajo tensión y por picadura. Transferencia tipo spray con baja salpicadura. Bajo sobrecalentamiento del electrodo reduciendo las pérdidas. Fácil inicio de arco reduciendo las posibilidades de defectos asociados al inicio de este. Excelente resistencia a la humedad.

Usos: Para aceros inoxidables dúplex con un contenido aproximado de 22% de cromo.

Aplicaciones típicas: Resistente a la corrosión intergranular y por pitting. Presenta ventajas en soldadura de aceros inoxidables del tipo austeno - ferrico como 18Cr/8Ni/Mo (3RE60) 22Cr/5Ni/3Mo (2205) y 23Cr/4Ni (2304). Posee buena resistencia a la corrosión bajo tensión, especialmente en ambientes que contienen H₂S.

Posiciones de soldadura: P, H, V, SC.

Tipo de corriente: CCEP, CA.

Composición química:

C: 0.03%	Mn: 1.01%
Si: 0.38%	P: 0.011%
S: 0.013%	Cr: 22.9%
Ni: 10.10%	Mo: 3.00%

Propiedades mecánicas:

Resistencia a la tracción 794 Mpa
Elongación (L=4d) 27%.

**INDURA 308 L**

AWS: ER 308L

Descripción: Esta diseñado para los procesos de soldadura con gas inerte (MIG y TIG). Tiene un análisis químico bien equilibrado, un contenido extra bajo de carbono que minimiza la precipitación de carburos. Propiedades mecánicas bien balanceadas. Arco estable de transferencia spray, en el caso de usar como protección gaseosa indurming inoxidable o argón.

Usos: El alambre 308L es similar al 308, excepto por su contenido extra bajo en carbono (menor a 0.03%). Es utilizado para soldar aceros AISI tipos 304L y 308L que pueden ser utilizados en un amplio rango de condiciones corrosivas, sin necesidad de hacer tratamientos térmicos posteriores a la soldadura.

Aplicaciones típicas: Aceros 308L, 304L, 308, 321 y 347. Equipos y estanques de proceso y almacenamiento de productos alimenticios y químicos. Bombas, intercambiadores de calor.

Posiciones de soldadura: P, H, V, SC.

Tipo de corriente: CCEP.

Composición química:

C: 0.02%	Mn: 1.90%
Si: 0.38%	P: 0.02%
S: 0.01%	Cr: 19.8%
Ni: 9.8%	Mo: 0.19%

Propiedades mecánicas:

Resistencia a la tracción 570 Mpa
Elongación (L=4d) 44%
Energía absorbida 90J a 0° C



* Fotografías referenciales.

MIG

INDURA 309 L

AWS: ER 309L

Descripción: Para procesos de soldadura con gas inerte (MIG y TIG). Arco estable de transferencia spray con Indurming Inox o argón. El bajo porcentaje de carbono reduce la precipitación de carburos incrementando la resistencia a la corrosión Inter-granular.

Usos: El alambre 309L es similar al 309, excepto por su contenido extra bajo de carbono (menos a 0.03%). Es utilizado para soldar aceros AISI tipo 309L que pueden ser utilizados en un amplio rango de condiciones corrosivas, sin necesidad de hacer tratamientos térmicos posteriores a la soldadura.

Aplicaciones típicas: Aceros 309L, 304L, 309, 321 y 347. Equipos de procesos y almacenamiento de productos alimenticios y químicos corrosivos.

Posiciones de soldadura: P, H, V, SC.

Tipo de corriente: CCEP.

Composición química:

C: 0.01%	Mn: 1.60%
Si: 0.42%	P: 0.021%
S: 0.002%	Cr: 23.0%
Ni: 13.7%	Mo: 0.05%

Propiedades mecánicas:

Resistencia a la tracción 570 Mpa
Elongación (L=4d) 42%
Energía absorbida 100J a 0° C



MIG

INDURA 316L

AWS: ER 316L

Descripción: Diseñado para procesos de soldadura con gas inerte (MIG y TIG). Análisis químico bien equilibrado, uniforme en el metal depositado y propiedades mecánicas bien balanceadas. Arco estable de transferencia spray con gases indurming inox. o argón.

Usos: Para aceros tipo 316L, 316, 318 y aleaciones similares con contenido extra bajo de carbono. El contenido de 0.04% de carbono máximo en el metal depositado, evita la formación y precipitación de carburos. Excelente protección contra la corrosión intergranular. Para aplicaciones resistentes a la corrosión cuando hay posibilidades de "picadura" (ataque por ácido). No es necesario tratamiento térmico posterior.

Aplicaciones típicas: Aceros 316, 316L y 318. Equipos químicos y petroquímicos. Industria alimenticia, de papel, turbinas y bombas, etc. Intercambiadores de calor.

Posiciones de soldadura: P, H, V, SC.

Tipo de corriente: CCEP.

Composición química:

C: 0.02%	Mn: 1.69%
Si: 0.38%	P: 0.030%
S: 0.008%	Cr: 18.1%
Ni: 11.1%	Mo: 2.1%

Propiedades mecánicas:

Resistencia a la tracción 570 Mpa
Elongación (L=4d) 40%
Energía absorbida 90J a 0° C



* Fotografías referenciales.

INDURA 308 LT1

AWS: E 308LT1-1/ E308LT1-4

Descripción: Alambre tubular con protección gaseosa externa. Gas de protección Indurming 20 ó 100% CO₂. Excelente soldabilidad y mejorada resistencia al creep a alta temperatura. El metal depositado contiene óptimo contenido de Ferrita en sus estructura austenítica, así su soldabilidad es excelente con baja susceptibilidad al agrietamiento.

Usos: Diseñado para soldadura MIG de aceros inoxidables tipo 18% Cr – 8%Ni de bajo contenido de carbono.

Aplicaciones típicas: Aceros inoxidables AISI 304, 304L, 304LN, ASTM A 157 Gr. C9, A320 Gr. B8C o D.

Posiciones de soldadura: P, H, V, SC.

Tipo de corriente: CCEP.

Composición química:

C: 0.03%	Mn: 1.90%
Si: 0.79%	Cr: 19.8%
Ni: 10.2%	Fe: balance

Propiedades mecánicas:

Resistencia a la tracción 610 Mpa
Elongación (L=4d) 35%

**INDURA 309 LT1**

AWS: E 309LT1-1/-4

Descripción: El metal depositado contiene bastante Ferrita a su estructura austenítica, de esta forma proporciona mejor soldabilidad junto con una elevada resistencia a la temperatura y a la corrosión. Es fácil de operar con poderosa penetración, transferencia tipo spray, mínima salpicadura y escoria auto desprendente.

Usos: Fue diseñado para soldadura MIG de aceros inoxidables tipo 18% Cr – 8%Ni de bajo contenido de carbono. Soldadura de uniones disímiles de y entre aceros de alta resistencia, soldadura de aceros al carbono y aceros de baja aleación templables y revenidos, aceros ferríticos al Cr y austeníticos al Cr- Ni y aceros al manganeso. Además para generar una primera capa resistente a la corrosión en soldadura de aceros ferríticos-perlíticos en partes de estanques a presión y calderas.

Aplicaciones típicas: Aceros inoxidables 309 y 309Cb, aceros disímiles y aceros al 12% Ni.

Posiciones de soldadura: P, H, V, SC.

Tipo de corriente: CCEP.

Composición química:

C: 0.03%	Mn: 1.92%
Si: 0.80%	Cr: 23.8%
Ni: 13.3%	Fe: balance

Propiedades mecánicas:

Resistencia a la tracción 600 Mpa
Elongación (L=4d) 38%



* Fotografías referenciales.

Tubular

INDURA 316 LT1

AWS: E316LT1-1/-4

Descripción: Alambre tubular con protección gaseosa externa, para soldadura de aceros inoxidable. Gas de protección: 100% CO₂ o Indurming 20. Posee escoria auto desprenderte, transferencia tipo spray, excelente soldabilidad y elevada resistencia al creep y altas temperaturas. El metal de soldadura contiene óptimo contenido de Ferrita en su estructura austenítica, de esta forma su soldabilidad es excelente con baja tendencia al agrietamiento.

Usos: Fue diseñado para soldadura MIG de acero inoxidable 18% Cr – 12% Ni – 2% Mo de bajo carbono. Posee bajo contenido de carbono lo cual le da buena resistencia para la mayoría de los tipos de corrosión del metal de soldadura.

Aplicaciones típicas: AISI 316L, 316Ti, 316Cb.

Posiciones de soldadura: P, H, V, SC.

Tipo de corriente: CCEP.

Composición química:

C: 0.03%	Mn: 1.85%
Si: 0.75%	Cr: 18.7%
Ni: 11.4%	Mo: 2.5%
Fe: balance	

Propiedades mecánicas:

Resistencia a la tracción 620 Mpa
Elongación (L=4d) 38%



Tubular

INDURA 308 L- O

AWS: E308LTO-3

Descripción: Alambre tubular autoprotectido para soldadura de acero inoxidable. La composición del metal depositado es la misma que la del electrodo E308LTO-3 excepto por el contenido de carbono. Su bajo contenido de carbono le permite obtener resistencia a la corrosión intergranular por precipitación de carburos, sin el uso de elementos estabilizadores tales como columbio y titanio.

Usos: Base de recubrimientos duros y rellenos de polines. Su metal depositado no es tan resistente a elevadas temperaturas como el depósito obtenido con E-308 estabilizado con columbio y titanio.

Aplicaciones típicas: Su depósito Cr-Ni permite soldar acero inoxidable calidades 302, 303, 304, 305, 308.

Posiciones de soldadura: P, H.

Tipo de corriente: CCEP.

Composición química:

C: 0.03%	Mn: 0.5-2.5%
Si: 1.0%	Cr: 19.5-21%
Ni: 9.0-11.0%	Fe: balance

Propiedades mecánicas:

Resistencia a la tracción 520 Mpa
Elongación (L=4d) 35%



* Fotografías referenciales.

TIG

INDURA 308/308H

AWS ER308/308H-16

Descripción: Varilla para soldar aceros inoxidables con proceso TIG. Composición nominal 19% cromo y 9% níquel. La composición química de la varilla ER-308H es la misma que la varilla ER-308 excepto que el contenido del carbono ha sido restringido al rango superior del aceptado para la varilla ER-308. El contenido de carbono de 0,04 a 0,08% proporciona más alta resistencia.

Usos: usada frecuentemente para soldar metales, base de composiciones similares. Apropiaada para temperatura de servicio hasta 750°C.

Aplicaciones típicas: Se encuentra en soldadura de metales base tipo 304H, 308H y sus derivados.

Posiciones de soldadura: P, H, V, SC.

Tipo de corriente: CCEP.

Composición química:

C: 0.05%	Mn: 1.85%
Si: 0.44%	P: 0.020
S: 0.001%	Cr: 19.90%
Ni: 9.29%	Cu: 0.09



TIG

INDURA 308 L

AWS: ER308 L

Descripción: Varilla con bajo contenido de carbono para soldar acero inoxidable con proceso TIG. El bajo contenido de carbono en el metal de aporte (0,03 máximo), disminuye la posibilidad de precipitación de carburos e incrementa la resistencia a la corrosión intergranular sin el uso de estabilizadores tales como columbio y titanio.

Usos: Adecuado para uso de aceros inoxidables que contienen 16-21% Cr, 8-13% Ni, aceros estabilizados y no estabilizados (302, 304, 304L, 304LN, 308, 321, 347).

Aplicaciones típicas: Equipos de proceso y almacenamiento de productos alimenticios y químicos. Bombas, intercambiadores de calor.

Posiciones de soldadura: P, H, V, SC.

Tipo de corriente: CCEN.

Composición química:

C: 0.02%	Mn: 1.90%
Si: 0.38%	P: 0.020
S: 0.01	Cr: 19.80%
Ni: 9.80%	Mo: 0.19%



* Fotografías referenciales.

TIG

INDURA 309L

AWS: ER 309L

Descripción: Varilla de bajo contenido de carbono para proceso TIG. Está diseñado para cumplir con los requisitos de los aceros inoxidable que utilizan procesos de soldadura con gas inerte. El bajo porcentaje de carbono en el metal depositado reduce la posibilidad de precipitación de carburos incrementando la resistencia a la corrosión intergranular.

Usos: Es utilizado para soldar aceros inoxidable AISI tipos 304L y 309L que pueden ser utilizados en un amplio rango de condiciones corrosivas.

Aplicaciones típicas: Aceros inoxidable 309L, 304L, 309, 321 y 347. Equipos de proceso y almacenamiento de productos alimenticios y químicos corrosivos.

Posiciones de soldadura: P, H, V, SC.

Tipo de corriente: CCEN.

Composición química:

C: 0.01%	Mn: 1.60%
Si: 0.42%	P: 0.021%
S: 0.002%	Cr: 23.0%
Ni: 13.7%	Mo: 0.05%



TIG

INDURA 316 H

AWS ER 316 H

Descripción: Varilla TIG para soldar aceros inoxidable. La composición química del metal de aporte es la misma que la varilla ER-316, excepto que el contenido de carbono ha sido restringido al rango superior aceptado por la varilla ER-316. El contenido de carbono de 0,04 a 0,08% proporciona más alta resistencia.

Usos: Apta para temperaturas de servicio hasta 750°C.

Aplicaciones típicas: Se encuentran en soldadura de metales base tipo 316H.

Posiciones de soldadura: P, H, V, SC.

Tipo de corriente: CCEN.

Composición química:

C: 0.05%	Mn: 1.64%
Si: 0.45%	P: 0.020
S: 0.003	Cr: 19.11%
Ni: 12.70%	Mo: 2.30%



* Fotografías referenciales.

TIG

INDURA 316 L

AWS ER 316 L

Descripción: Varilla de bajo contenido de carbono para proceso TIG. Formulada para cumplir con los requisitos de los aceros inoxidable que utilizan procesos de soldadura con gas inerte. El bajo porcentaje de carbono en el metal depositado reduce la posibilidad de precipitación de carburos incrementando la resistencia a la corrosión intergranular.

Usos: Uso en industria alimenticia, de papel, turbinas, bombas. Se recomienda para aplicaciones resistentes a la corrosión cuando hay posibilidades de "picadura" (ataque por ácido).

Aplicaciones típicas: Soldadura de aceros inoxidable que contienen 16-21% Cr, 10-15% Ni, 0-3% Mo, aceros estabilizados y no estabilizados tipos 316, 316L, 317, 317L, 316Ti, 318.

Posiciones de soldadura: P, H, V, SC.

Tipo de corriente: CCEN.

Composición química:

C: 0.02%	Mn: 1.69%
Si: 0.38%	P: 0.030
S: 0.008	Cr: 18.1%
Ni: 11.1%	Mo: 2.1%



TIG

INDURA 2209

AWS ER 2209

Descripción: Varilla TIG con estructura dúplex, la cual lo hace altamente resistente a la corrosión bajo tensión en ambientes con presencia de cloruros. El alto contenido de cromo y molibdeno proporciona excelente resistencia a la corrosión por pitting.

Usos: Debido al balance existente entre estas dos fases, presentan ventajas en severas condiciones de cloruros. Combinan algunas de las mejores características de los aceros inoxidable austeníticos y ferríticos. La Austenita proporciona ductilidad y la Ferrita resistencia a la corrosión bajo tensión.

Aplicaciones típicas: Para soldadura de aceros inoxidable del tipo austeno-ferrítico como 18Cr/8Ni/Mo (3RE60), 22Cr/5Ni/3Mo (2205) 23Cr/4Ni (2304).

Posiciones de soldadura: P, H, V, SC.

Tipo de corriente: CCEN.

Composición química:

C: 0.02%	Mn: 1.33%
Si: 0.46%	P: 0.020
S: 0.01	Cr: 23.32%
Ni: 8.15%	Mo: 3.15%
N: 0.15	



* Fotografías referenciales.

COMPOSICIÓN QUÍMICA TÍPICA DE ELECTRODOS DE ACERO INOXIDABLE

Sistema	Clasificación AWS	Electrodo INDURA	Corriente	Composición Química								Otros	
				C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo		
Arco Manual	E308-16 E308H-16	308/308H	CA - CC	0,05	0,54	0,67	0,021	0,005	18,7	10,2	0,07		
	E308L-16	308L	CA - CC	0,02	0,63	0,76	0,025	0,008	18,7	10,0	0,18		
	E309L-16	309L	CA - CC	0,02	0,69	0,80	0,022	0,009	22,5	13,4	0,16		
	E309LMo-16	309MoL	CA - CC	0,02	0,73	0,51	0,018	0,010	22,3	12,5	2,39		
	E310-16	25-20	CA - CC	0,13	1,25	0,71	0,021	0,008	25,8	21,4	0,10		
	E312-16	29-9S	CA - CC	0,11	0,97	0,69	0,028	0,003	29,0	10,1	0,23		
	E319-16	316L	CA-CC	0,02	0,63	0,77	0,022	0,009	18,5	11,7	2,70		
	E316-16 E316H-16	316/316H	CA-CC	0,05	1,20	0,80	0,020	0,020	18,7	12,0	2,30		
	E347-16	347	CA-CC	0,03	0,76	0,90	0,032	0,005	18,5	10,0	0,25	0,40Nb	
	E410NiMo-15	13/4	CC	0,04	0,48	0,29	0,019	0,011	11,5	4,1	0,48		
	E2209-16	2209	CA-CC	0,03	1,01	0,38	0,011	0,013	22,9	10,1	3,00		
	MIG Sólido	ER-308L	308L	CC	0,02	1,90	0,38	0,02	0,01	19,8	9,8	0,19	
		ER-309L	309L	CC	0,01	1,6	0,42	0,021	0,002	23,0	13,7	0,05	
ER-316L		316L	CC	0,02	1,69	0,38	0,03	0,008	18,1	11,1	2,1		
MIG Tubular	E308LT1-1/-4	308L-T1	CC	0,03	1,90	0,79			19,8	10,2			
	E309LT1-1/-4	309L-T1	CC	0,03	1,92	0,80			23,8	13,3			
	E309LT1-1/-4	316L-T1	CC	0,03	1,85	0,75			18,7	11,4	2,5		
	E308LT0-3	308L-0	CC	0,03	0,5-2,5	1,0			19,5-21	9-11	0,5		
TIG	ER308 308H-16	308/308H	CC	0,05	1,85	0,44	0,02	0,001	19,9	9,29		0,09Cu	
	ER308L	308L	CC	0,02	1,9	0,38	0,02	0,01	19,8	9,8			
	ER309L	309L	CC	0,01	1,6	0,42	0,021	0,002	23,1	13,7			
	ER316H	316H	CC	0,049	1,64	0,45	0,02	0,003	19,1	12,7	2,3	0,1	
	ER316L	316L	CC	0,019	1,69	0,38	0,03	0,008	18,1	11,1	2,1		
	ER2209	2209	CC	0,002	1,33	0,46	0,02	0,001	23,32	8,15	3,15	0,10Cu 0,15N	

Propiedades Mecánicas Típicas del metal depositado

Sistema	Clasificación AWS	Electrodo INDURA	Tratamiento Térmico (°C)	Resistencia a la tracción	Alargamiento en 50mm.	
Arco Manual	E308-16/E308H-16	308/308H	Sin T.T.	590	53	
	E308L-16	308L	Sin T.T.	560	41	
	E309L-16	309L	Sin T.T.	555	42	
	E309LMo-16	309MoL	Sin T.T.	680	40	
	E310-16	25-20	Sin T.T.	593	30	
	E312-16	29-9 S	Sin T.T.	754	32	
	E316L-16	316L	Sin T.T.	580	48	
	E316-16/E316H-16	316/316H	Sin T.T.	600	35	
	E347-16	347	Sin T.T.	650	39	
	E410NiMo-15	13(SLASH)4	610°C X 1hr	827	17	
	E2209-16	2209	Sin T.T.	794	27	
	MIG Sólido	ER-308L	308L	Sin T.T.	570	44
		ER-309L	309L	Sin T.T.	570	42
ER-316L		316L	Sin T.T.	570	40	
MIG Tubular	E308LT1-1/-4	308L-T1		610	35	
	E309LT1-1/-4	309L-T1		600	38	
	E309LT1-1/-4	316L-T1		620	38	
	E308LT0-3	308L-0		520*	35*	
TIG	ER308/308H-16	308/308H				
	ER308L	308L				
	ER309L	309L				
	ER316H	316H				
	ER316L	316L				
	ER2209	2209				

* : Valores mínimos

COMPOSICIÓN QUÍMICA TÍPICA DE ACEROS INOXIDABLES (MATERIAL BASE)

Composición % (a)

TIPO AISI AUSTENITICOS	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	OTROS
201	0,15	5,5-7,5	1,00	16,0-18,0	3,5-5,5	0,06	0,03	0,25N
202	0,15	7,5-10,0	1,00	17,0-19,0	4,0-6,0	0,06	0,03	0,25N
205	0,12-0,25	14,0-15,5	1,00	16,5-18,0	1,0-1,75	0,06	0,03	0,32-0,40N
301	0,15	2,00	1,00	16,0-18,0	6,0-8,0	0,045	0,03	
302	0,15	2,00	1,00	17,0-19,0	8,0-10,0	0,045	0,03	
302B	0,15	2,00	2,0-3,0	17,0-19,0	8,0-10,0	0,045	0,03	
303	0,15	2,00	1,00	17,0-19,0	8,0-10,0	0,20	0,15min	0,6 Mo
303Se	0,15	2,00	1,00	17,0-19,0	8,0-10,0	0,20	0,06	0,15min Se
304	0,08	2,00	1,00	18,0-20,0	8,0-10,5	0,045	0,03	
304H	0,04-0,10	2,00	1,00	18,0-20,0	8,0-10,5	0,045	0,03	
304L	0,03	2,00	1,00	18,0-20,0	8,0-12,0	0,045	0,03	
304LN	0,03	2,00	1,00	18,0-20,0	8,0-12,0	0,045	0,03	0,10-0,16N
302Cu	0,08	2,00	1,00	17,0-19,0	8,0-10,0	0,045	0,03	3,0-4,0Cu
304N	0,08	2,00	1,00	18,0-20,0	8,0-10,5	0,045	0,03	0,10-0,16N
305	0,12	2,00	1,00	17,0-19,0	10,5-13,0	0,045	0,03	
308	0,08	2,00	1,00	19,0-21,0	10,0-12,0	0,045	0,03	
309	0,20	2,00	1,00	22,0-24,0	12,0-15,0	0,045	0,03	
309S	0,08	2,00	1,00	22,0-24,0	12,0-15,0	0,045	0,03	
310	0,25	2,00	1,50	24,0-26,0	19,0-22,0	0,045	0,03	
310S	0,08	2,00	1,50	24,0-26,0	19,0-22,0	0,045	0,03	
314	0,25	2,00	1,5-3,0	23,0-26,0	19,0-22,0	0,045	0,03	
316	0,08	2,00	1,00	16,0-18,0	10,0-14,0	0,045	0,03	2,0-3,0Mo
316F	0,08	2,00	1,00	16,0-18,0	10,0-14,0	0,20	0,10min	1,75-2,5Mo
316H	0,04-0,10	2,00	1,00	16,0-18,0	10,0-14,0	0,045	0,03	2,0-3,0Mo
316L	0,03	2,00	1,00	16,0-18,0	10,0-14,0	0,045	0,03	2,0-3,0Mo
316LN	0,03	2,00	1,00	16,0-18,0	10,0-14,0	0,045	0,03	2,0-3,0Mo;0,10-0,16N
316N	0,08	2,00	1,00	16,0-18,0	10,0-14,0	0,045	0,03	2,0-3,0Mo;0,10-0,16N
317	0,08	2,00	1,00	18,0-20,0	11,0-15,0	0,045	0,03	3,0-4,0Mo
317L	0,03	2,00	1,00	18,0-20,0	11,0-15,0	0,045	0,03	3,0-4,0Mo
321	0,08	2,00	1,00	17,0-19,0	9,0-12,0	0,045	0,03	5x% C min Ti
321H	0,04-0,010	2,00	1,00	17,0-19,0	9,0-12,0	0,045	0,03	5x% C min Ti
330	0,08	2,00	0,75-1,5	17,0-20,0	34,0-37,0	0,04	0,03	
347	0,0,8	2,00	1,00	17,0-19,0	9,0-13,0	0,045	0,03	10x%C min Nb
347H	0,04-0,10	2,00	1,00	17,0-19,0	9,0-13,0	0,045	0,03	8x%Cmin-1,0max-Nb
348	0,08	2,00	1,00	17,0-19,0	9,0-13,0	0,045	0,03	0,2Co;10x%C
348H	0,04-0,10	2,00	1,00	17,0-19,0	9,0-13,0	0,045	0,03	
384	0,08	2,00	1,00	15,0-17,0	17,0-19,0	0,045	0,03	

FERRITICOS	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	OTROS
405	0,08	1,00	1,00	11,5-14,5		0,04	0,03	0,10-0,30Al
409	0,08	1,00	1,00	10,5-11,75	0,50	0,045	0,045	6x%C min - 0,75 max Ti
429	0,12	1,00	1,00	14,0-11,75		0,04	0,03	
430	0,12	1,00	1,00	16,0-16,0		0,04	0,03	
430F	0,12	1,25	1,00	16,0-18,0		0,06	0,15min	0,6 Mo
430F Se	0,12	1,25	1,00	16,0-18,0		0,06	0,06	0,15 min Se
434	0,12	1,00	1,00	16,0-18,0		0,04	0,03	0,75-1,25 Mo
436	0,12	1,00	1,00	16,0-18,0		0,04	0,03	0,75-1,25Mo;5x%Cmin-0,70mx Nb
								0,15Al;12x%Cmin-1,10Ti
439	0,07	1,00	1,00	17,0-19-0	0,50	0,04	0,03	
442	0,20	1,00	1,00	18,0-23,0		0,04	0,03	1,75;2,50Mo;0,025N;
								0,2+4(%C+%N)min-0,8max(Ti+Nb)
444	0,025	1,00	1,00	17,5-19,5	1,00	0,04	0,03	0,25N
446	0,20	1,50	1,00	23,0-27,0		0,04	0,03	

MARTENSITICOS	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	OTROS
403	0,15	1,00	0,50	11,5-13,0		0,04	0,03	
410	0,15	1,00	1,00	11,5-13,5		0,04	0,03	
414	0,15	1,00	1,00	11,5-13,5	1,25-2,50	0,04	0,03	
416	0,15	1,25	1,00	12,0-14,0		0,06	0,15min	0,6Mo
416Se	0,15	1,25	1,00	12,0-14,0		0,06	0,06	0,15min Se
420	0,15min	1,00	1,00	12,0-14,0		0,04	0,03	
420F	0,15min	1,25	1,00	12,0-14,0		0,06	0,15min	0,6Mo
422	0,20-0,25	1,00	0,75	11,5-13,5	0,5-1,0	0,04	0,03	0,75-1,25Mo,0,75-1,25W,0,15-0,3V
431	0,20	1,00	1,00	15,0-17,0	1,25-2,50	0,04	0,03	
440A	0,60-0,75	1,00	1,00	16,0-18,0		0,04	0,03	0,75Mo
440B	0,75-0,95	1,00	1,00	16,0-18,0		0,04	0,03	0,75Mo
440C	0,95-1,20	1,00	1,00	16,0-18,0		0,04	0,03	0,75Mo

DUREZA

TABLA COMPARATIVA DE DUREZA

Brinell	Vickers	Rockwell		Resistencia a la tracción x 1000 psi	Brinell	Vickers	Rockwell		Resistencia a la tracción x 1000 psi
		C	B				C	B	
898				440	223	223	20	97	110
857				420	217	217	18	96	107
817				401	212	212	17	96	104
780	1150	70		384	207	207	16	95	101
745	1050	68		368	202	202	15	94	99
712	960	66		352	197	197	13	93	97
682	885	64		337	192	192	12	92	95
653	820	62		324	187	187	10	91	93
627	765	60		311	183	183	9	90	91
601	717	58		298	179	179	8	89	89
578	675	57		287	174	174	7	88	87
555	633	55	120	276	170	170	6	87	85
534	598	53	119	266	166	166	4	86	83
514	567	52	119	256	163	163	3	85	82
495	540	50	117	247	159	159	2	84	80
477	515	49	117	238	156	156	1	83	78
461	494	47	116	229	153	153		82	76
444	472	46	115	220	149	149		81	75
429	454	45	115	212	146	146		80	74
415	437	44	114	204	143	143		79	72
401	420	42	113	196	140	140		78	71
388	404	41	112	189	137	137		77	70
375	389	40	112	182	134	134		76	68
363	375	38	110	176	131	131		74	66
352	363	37	110	170	128	128		73	65
341	350	36	109	165	126	126		72	64
331	339	35	109	160	124	124		71	63
321	327	34	108	155	121	121		70	62
311	316	33	108	150	118	118		69	61
302	305	32	107	146	116	116		68	60
293	296	31	106	142	114	114		67	59
285	287	30	105	138	112	112		66	58
277	279	29	104	134	109	109		65	56
269	270	28	104	131	107	107		64	56
262	263	26	103	128	105	105		62	54
255	256	25	102	125	103	103		61	53
248	248	24	102	122	101	101		60	52
241	241	23	100	119	99	99		59	51
235	235	22	99	116	97	97		57	50
229	229	21	98	113	95	95		56	49

Recomendaciones de electrodos de Acero Inoxidable de acuerdo al material base.

Material base AISI N°	1º alternativa Electrodo INDURA	1º alternativa Clasificación AWS	2º alternativa Electrodo INDURA	2º alternativa Clasificación AWS
	308	E308-16	308L	E308L-16
202	308	E308-16	308L	E308L-16
301	308	E308-16	308L	E308L-16
302	308	E308-16	308L	E308L-16
302B	308	E308-16	309	E309L-16
303				
303Se				
304	308	E308-16	308L	E308L-16
304L	308L	E308L-16	347	E347-16
305	308	E308-16	308L	E308L-16
308	308	E308-16	308L	E308L-16
309	309	E309-16	309L	E309L-16
309S	309	E309-16	309L	E309L-16
310	25-20	E310-16		
310S	25-20	E310-16		
314	25-20	E310-16		
316	316	E316-16	316L	E316L-16
316L	316L	E316L-16		
317	317	E317-16	309Cb	E309Cb-16
321	347	E347-16	308L	E308L-16
347	347	E347-16	308L	E308L-16
348	347	E347-16		
403	410	E410-16		
410	410	E410-16	430	E430-16
410NiMo	13(SLASH)4	E410NiMo-15		
414	410	E410-16		
416	410	E410-16		
416Se				
420	410	E410-16		
431	430	E430-16		
440A				
440B				
440C				
405	410	E410-16	405Cb	E405Cb-16
430	430	E430-16	309	E309-16
430F				
430FSe				
446	309	E309-16	310	E310-16
501	502	E502-16		
502	502	E502-16		

BIBLIOGRAFÍA

1.- ASM International, Metal Handbook, Tenth Edition, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, 1990.

2.- ASM International, Metal Handbook, NN Edition, Volume 6, Welding, Brazing, and Soldering, 1993.

3.- ASTM A380, Standard Recommended Practice for Cleaning and Descaling Stainless Steel Parts, Equipment, and Systems.

4.- ANSI/AWS D10.4-86, Recommended Practices for Welding Austenitic Chromium-Nickel Stainless Steel Piping and Tubing.

5.- ANSI/AWS D10.11-87, Recommended Practices for Root Pass Welding of Pipe Without Backing.

6.- Adrián Inchaurreza Zabala, Aceros Inoxidables y Aceros Resistentes al Calor, Propiedades, Transformaciones y Normas, 1981.

7.- NiDI, Nickel Development Institute, Reference Book, Series N°11007, Guidelines for the welded fabrication of nickel-containing stainless steels for corrosion resistant services.

Oficinas INDURA

ARGENTINA

INDURA Argentina S.A.

Dirección: Ruta Panamericana Norte

Km 37.5 Parque Industrial Garín

Buenos Aires, Argentina.

Centro de Servicio al Cliente:

0810 810 6003

CHILE

INDURA S.A. Industria y Comercio

Dirección: Av. Las Américas 585 Cerrillos,

Santiago, Chile.

Centro de Servicio al Cliente:

600 600 3030

COLOMBIA

CRYOGAS S.A.

Dirección: Carrera 50 # 52-50

Edificio Unión Plaza, Piso 10

Medellín, Colombia.

Centro de Servicio al Cliente:

01 8000 514 300

ECUADOR

INDURA Ecuador S.A.

Dirección: Kilómetro 14 1/2 vía Daule,

Guayaquil, Ecuador.

Centro de Servicio al Cliente:

1800 463872

MÉXICO

INDURAMEX S.A. de C.V.

Dirección: Av. Gustavo Baz N° 180,

Bodega D-3 Col. San Jerónimo Tepetlcalco,

Tlalnepantla, Edo. de México.

C.P. 54090

Centro de Servicio al Cliente:

01 800 0046387

PERÚ

INDURA S.A. Perú

Dirección: Av. El Pacífico 401-425,

Independencia, Lima, Perú.

Centro de Servicio al Cliente:

0801 70670



INDURA[®]
www.indura.net