

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS

TESIS

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

PABLO RODOLFO ZÚÑIGA RAMÍREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 1999.

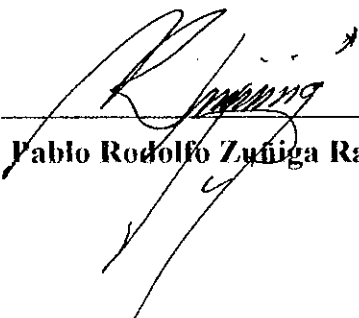


HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 25 de febrero de 1999.



Pablo Rodolfo Zuñiga Ramírez

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
VOCAL 1o.	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL 2o.	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
VOCAL 3o.	Ing. Jorge Benjamín Gutiérrez Quintana
VOCAL 4o.	Br. Oscar Stuardo Chinchilla Guzmán
VOCAL 5o.	Br. Mauricio Alberto Grajeda Mariscal
SECRETARIA	Ing. Gilda Marina Castellanos Baiza de Illescas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
EXAMINADOR	Ing. Víctor Eduardo Izquierdo Palacios
EXAMINADOR	Ing. Raymond Ludwing Taylor Cruz
EXAMINADOR	Ing. Julio César Campos Paiz
SECRETARIA	Ing. Gilda Marina Castellanos Baiza de Illescas

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA
Escuela de Mecánica
Coordinación de Laboratorios
Procesos de manufactura 2
Ciudad Universitaria, Zona 12
91012 Guatemala, Centroamérica

Guatemala, 17 de agosto de 1999.

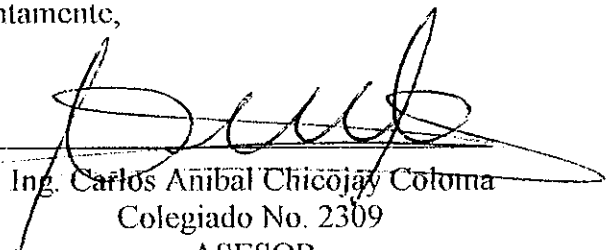
Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez,
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica,
Facultad de Ingeniería,
Universidad de San Carlos de Guatemala.

Señor Director:

Respetuosamente me dirijo a usted, con el propósito de informarle que, luego de haber revisado el trabajo de Tesis titulado: **"SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS"**, el cual fue presentado por el estudiante **Br. Ind. Pablo Rodolfo Zuñiga Ramírez** y, después de haberle realizado las correcciones pertinentes, considero que cumple con los objetivos que le dieron origen.

Por lo tanto, hago de su conocimiento que, en mi opinión, dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser sometido a discusión en su examen General Público y recomiendo su aprobación para el efecto.

Atentamente,



Ing. Carlos Anibal Chicojáy Coloma
Colegiado No. 2309
ASESOR



FACULTAD DE INGENIERIA

El Coordinador del Area Materiales y Complementaria de la Escuela de Ingenieria Mecánica, luego de conocer la aprobación del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo titulado Soldabilidad de los Aceros, de el estudiante Pablo Rodolfo Zúñiga Ramírez, recomienda su aprobación.

ID Y ENFERAD A TODOS

Ing. José Antonio Estrada Martínez
Coordinador de Área

Guatemala, septiembre de 1,999.



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, Escuela Técnica, Ingeniería en Sistemas Ingeniería Electrónica y Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos.
Apartado Postal 217-1-01-907, Guatemala
Ciudad Universitaria, Zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con el visto bueno del Coordinador del Área Materiales, al trabajo de tesis, Soldabilidad de los Aceros, del estudiante Pablo Rodolfo Zúñiga Ramírez, procede a la autorización del mismo.

CO Y ENSEÑANZA A TODOS

Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez



Guatemala, octubre de 1,999.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, Escuela Técnica, Ingeniería en Sistemas Ingeniería Electrónica y Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos.
Apartado Postal 217-1-01-907, Guatemala
Ciudad Universitaria, Zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, Ingeniero Carlos Humberto Pérez Rodríguez, al trabajo de tesis titulado Soldabilidad de los Aceros, presentado por el estudiante universitario Fabio Rodolfo Zúñiga Ramírez, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRIMASE

ING. HERBERT RENE MIRANDA BARRIOS

DECANO

Guatemala, octubre de 1,999.



ÍNDICE GENERAL

	Página
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	VIII
INTRODUCCIÓN	XIV
1 ARCO MANUAL	1
1.1 Descripción del proceso	1
1.2 Clasificación de electrodos AWS-ASTM	2
1.2.1 Electrodo para soldar acero dulce	2
1.2.2 Electrodos de baja aleación	4
1.2.3 Electrodos para soldar aceros inoxidable	5
1.3 Sistema de clasificación según AWS	6
1.4 Clasificación de los electrodos según el tipo de metal en que se aplican	7
1.5 Clasificación de los electrodos según su revestimiento	7
1.6 Almacenamiento de los electrodos	8
2 SISTEMA DE SOLDADURA GTAW	13
2.1 Ventajas y aplicaciones	15
2.2 Soldadura aplicada con corriente continua	16
2.3 Soldadura aplicada con corriente alterna	17
2.4 Electrodos para el sistema GTAW	18
2.5 Varillas para el sistema GTAW	19
2.6 Gases de protección	20

3	ACEROS	22
3.1	Propiedades físicas y mecánicas	23
3.2	Aspectos metalúrgicos	25
3.2.1	Estructura cristalina de los metales	25
3.2.2	Diagramas de fase	28
3.2.2.1	Diagrama hierro-carbono	29
3.2.2.1.1	Cambios significativos en el diagrama	31
3.2.2.2	Diagrama de transformación isotérmica	33
3.3	Fenómenos térmicos	36
3.3.1	Características térmicas de la soldadura	36
3.3.2	Efecto del precalentamiento	41
3.3.3	Efecto del postcalentamiento	43
3.4	Tratamiento térmico de los aceros	44
3.5	Soldabilidad de los aceros	46
3.6	Soldabilidad de algunos metales base	47
3.7	Acero manganeso	49
3.7.1	Descripción y propiedades	49
3.7.2	Efectos del calentamiento	50
3.7.3	Resistencia al desgaste	51
3.7.4	Soldabilidad de los aceros al manganeso	51
3.8	Aceros inoxidable	52
3.8.1	Clasificación de los aceros inoxidable	54
3.8.1.1	Según la serie AISI	54
3.8.1.2	Según la estructura formada por sus átomos	55
3.8.1.2.1	Aceros inoxidable martensíticos	55
3.8.1.2.2	Aceros inoxidable ferríticos	56
3.8.1.2.3	Aceros inoxidable austeníticos	57
3.8.2	Efecto de la precipitación de carburos o sensibilización	58

3.8.2.1	Tratamiento térmico de solubilización	59
3.8.2.2	Aceros inoxidables con contenido extra-bajo de carbono	59
3.8.2.3	Aceros inoxidables estabilizados	59
3.8.3	Tipos de corrosión	60
3.8.3.1	Corrosión intercrystalina	60
3.8.3.2	Corrosión en forma de lámina de cuchillo	61
3.8.3.3	Corrosión bajo tensiones	61
3.8.3.4	Picaduras	61
3.8.3.5	Corrosión en grietas	62
3.8.4	Microfisuración en uniones soldadas	63
3.8.4.1	Prevención de la microfisuración	63
3.8.4.2	Diagrama de Schaeffler	64
3.8.4.3	Diagrama de Delong	65
3.8.5	Tratamientos térmicos	67
3.8.5.1	Precalentamiento	67
3.8.5.2	Post-tratamiento de alivio de tensiones	67
3.8.6	Procedimiento para soldar los aceros inoxidables	68
3.8.7	Composición química de los aceros	68
3.8.8	Temperaturas de precalentamiento para diferentes aceros	70
4	RECUBRIMIENTOS DE PROTECCIÓN	72
4.1	Ventajas económicas del recubrimiento	73
4.2	Factores y tipos de desgaste	73
4.3	Características de los procesos de recubrimiento	75
4.4	Defectos y soluciones en la aplicación de recubrimientos protectores	76
4.5	Diferencia entre fisuras transversales y grietas	78
4.6	El hierro fundido y su soldabilidad	78

4.7	Materiales de aporte	81
4.8	Procedimientos de aplicación	82
5	RECUBRIMIENTOS PARA MANTENIMIENTO	84
5.1	Electrodos para mantenimiento	84
5.2	Resistencia comparativa al impacto y abrasión	85
5.3	Electrodos para recubrimientos duros	86
	CONCLUSIONES	89
	RECOMENDACIONES	90
	REFERENCIAS	91
	BIBLIOGRAFÍA	92

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

No.	Título	Pág.
1	Proceso de soldadura por arco	1
2	Aspectos esenciales del proceso GTAW	13
3	Equipo para el sistema GTAW	14
4	Comparación entre la polaridad directa y la invertida	16
5	Ensayos de dureza de uso comercial	23
6	Cristal cúbico (FCC)	26
7	Cristal cúbico (BCC)	27
8	Diagrama hierro – carbono	30
9	Microestructura de la ferrita y la perlita	32
10	Diagrama de transformación isotérmica para el acero	34
11	Microestructura de la martensita	36
12	Distribución de temperaturas en una unión soldada	37
13	Ciclos térmicos experimentados en una soldadura	38
14	Diagrama de la zona afectada por el calor y su relación con el diagrama hierro – carbono	40
15	Diagrama de transformación isotérmica, con y sin precalentamiento	41
16	Influencia de la temperatura y el tiempo en el relevado de esfuerzos	44
17	Estructura de una soldadura sin tratamiento térmico posterior	47
18	Relación entre el contenido de carbono y cromo en un acero inoxidable	55

19	Diagrama de Schaeffler	64
20	Diagrama de Delong	65
21	Microestructura del metal depositado 316L	66

TABLAS

No.	Título	Pág.
I	Interpretación del último dígito en la clasificación AWS	3
II	Designación AWS de los principales elementos de aleación presentes en los electrodos	4
III	Condiciones de almacenamiento y mantenimiento de electrodos	10
IV	Condiciones para el resecado de los electrodos	11
V	Recomendaciones para el uso de electrodos de bajo hidrógeno	12
VI	Identificación de los electrodos de tungsteno	18
VII	Cuadro de selección de electrodos	19
VIII	Principales elementos aleantes en los aceros	22
IX	Transformaciones del hierro puro	27
X	Efectos de los elementos de aleación e impurezas en los aceros inoxidable	53
XI	Temperaturas de precalentamiento (1ª parte)	70
XII	Temperaturas de precalentamiento (2ª parte)	71
XIII	Características de los procesos de aplicación	76
XIV	Resistencia comparativa según la función de algunos electrodos	86

LISTA DE SÍMBOLOS

Al	Aluminio
C	Carbono
CA	Corriente alterna
CC	Corriente continua
CD	Corriente directa
C_{equiv}	Carbono equivalente
Cr	Cromo
H	Hidrógeno
HB	Dureza Brinell
Mn	Manganeso
Mo	Molibdeno
N	Nitrógeno
Ni	Níquel
O	Oxígeno
P	Fósforo
PD	Polaridad directa
PI	Polaridad invertida
Re	Dureza Rockwell
S	Azufre
Si	Silicio
T.T.T	Tiempo, temperatura, transformación
V	Vanadio
Zr	Zirconio

GLOSARIO

Acero	Aleación a partir de hierro, maleable en cierto intervalo de temperatura tal como sale de su vaciado inicial, contiene manganeso, generalmente carbono y a menudo otros elementos de aleación.
Acero al carbono	Acero que contiene hasta aproximadamente 2% de carbono y sólo cantidades residuales de otros elementos, excepto los que se agregan para desoxidación, y cuyo contenido de silicio está limitado generalmente a 0.6%, y el de manganeso a alrededor de 1.65%. También se le llama acero al carbono simple, acero ordinario.
Acero aleado	Acero que contiene cantidades significativas de elementos de aleación (además del carbono y de las cantidades comúnmente aceptadas de manganeso, silicio, azufre y fósforo).
Acero austenítico	Acero aleado cuya estructura es normalmente austenítica a la temperatura ambiente.
Acero dulce	Acero al carbono con un máximo de alrededor de 0.25% de carbono.

AISI	“American Iron and Steel Institute” Instituto Americano del Hierro y Acero.
Aleación	Substancia que tiene propiedades metálicas y que está compuesta por dos o más elementos químicos, de los cuales por lo menos uno es un metal elemental.
Alotropía	Fenómeno reversible por el cual pueden existir ciertos metales en más de una estructura cristalina. Si no es reversible recibe el nombre de polimorfismo.
ASTM	“American Society for Testing Materials” Sociedad Americana para la Medición de Materiales.
Austemplado	Enfriamiento rápido de una aleación ferrosa desde una temperatura superior a su intervalo de transformación, en un medio que tenga un régimen de absorción de calor lo suficientemente elevado como para impedir la formación de productos de transformación por alta temperatura.
Austenita	Solución sólida de uno o más elementos de hierro cúbico centrado en las caras. De no indicarse otra cosa el elemento de solución se supone generalmente que es el carbono.
AWS	“American Welding Society” Sociedad Americana de Soldadura.

BCC	Cristal cúbico centrado en el cuerpo.
Cordón de soldadura	Depósito de metal de aporte hecho mediante una sola pasada de soldadura.
Cráter	Depresión que se forma en la terminación de un cordón ó en el foso de fusión bajo el electrodo.
Diagrama de equilibrio	Representación gráfica de los límites de temperatura, presión y composición de los campos de fase en un sistema de aleaciones.
Dureza	Resistencia de un metal a la deformación plástica (generalmente por indentación). Sin embargo, la palabra puede referirse también a la rigidez o al temple, o bien, a la resistencia al rayado, a la abrasión o al corte. Para las ruedas de esmeril significa lo mismo que el grado.
Elasticidad	Propiedad de un metal por virtud de la cual tiende a recuperar su tamaño y forma originales después de sufrir deformación.
Envejecimiento	En un metal o aleación, un cambio de las propiedades que generalmente tiene lugar en forma lenta a la temperatura ambiente y con mayor rapidez a temperaturas mayores.
Esferoidita	Un agregado de hierro o carburos aleados en forma esencialmente esférica disperso en una matriz de ferrita.

FCC	Cristal cúbico centrado en la cara.
GMAW	“Gas Metalic Arc Weld” Soldadura con Arco Metálico y Gas.
GTAW	“Gas Tungsten Arc Weld” Soldadura con Arco de Tungsteno y Gas.
Hierro fundido	Un hierro que contiene carbono en exceso de la solubilidad en la austenita que existe en la aleación a la temperatura eutéctica.
Límite elástico	Esfuerzo máximo al que puede someterse un material sin que se produzca una deformación que permanezca después de suprimir completamente el esfuerzo.
Martemplado	Enfriado rápido de una aleación ferrosa austenitizada en un medio a una temperatura situada en la parte superior del intervalo de la martensita, o ligeramente arriba de dicho intervalo.
Martensita	En una aleación, una estructura metastable de transición, intermedia entre dos modificaciones alotrópicas cuyas capacidades para disolver una sustancia dada difieren considerablemente, teniendo la fase de alta temperatura la mayor solubilidad.

Punto de fluencia	El primer esfuerzo en un material, generalmente menor que el esfuerzo máximo alcanzable, al que ocurre un incremento en la deformación sin haber incremento del esfuerzo.
SAE	“Society of Automotive Engineers” Sociedad de Ingenieros Automotrices.
Soldadura	Es la unión de dos o más piezas de material que se logra mediante la aplicación de calor, presión, o ambos, con o sin material de aporte, para producir una unión localizada por fusión o recristalización transversalmente a la entrecara.
Temperatura de transformación	La temperatura a la cual ocurre o tiene lugar un cambio de fase. Se emplea a veces esta expresión para designar la temperatura de límite de un intervalo de transformación.
Templabilidad	En una aleación ferrosa, la propiedad que determina la profundidad y distribución de la dureza inducida por el enfriamiento rápido.
Tratamiento térmico	Calentamiento y enfriamiento de un metal sólido o de una aleación que se efectúa con el objeto de obtener condiciones o propiedades deseadas.

Zona afectada por el calor (ZAC), o zona afectada termicamente (ZAT).

La porción del metal de base que no se fundió durante el proceso de soldadura fuerte, de corte o de soldadura eléctrica, pero cuya microestructura y propiedades físicas fueron alteradas por el calor.

INTRODUCCIÓN

El procedimiento y la técnica que se utilizaban antiguamente para la soldadura de los aceros, impedían la soldabilidad adecuada de éstos, ya que se carecía de equipo para poder estudiar los efectos que causaba el calor en dichos metales. Hoy en día, las técnicas y procedimientos adecuados para soldar los aceros han ido mejorando, ya que se cuenta con el equipo para analizar no sólo la composición química de los aceros, sino también para estudiar su estructura cristalina antes y después de ser soldados.

La soldabilidad de los aceros se ve también afectada por el proceso de soldadura que se esté utilizando. El proceso de soldadura al arco eléctrico con electrodo convencional y el proceso de soldadura al arco eléctrico con arco de tungsteno y gas de protección (GTAW), son los dos procesos que más se utilizan para la soldadura de los aceros; por supuesto el proceso de arco de tungsteno con gas de protección produce mejores soldaduras en dichos metales.

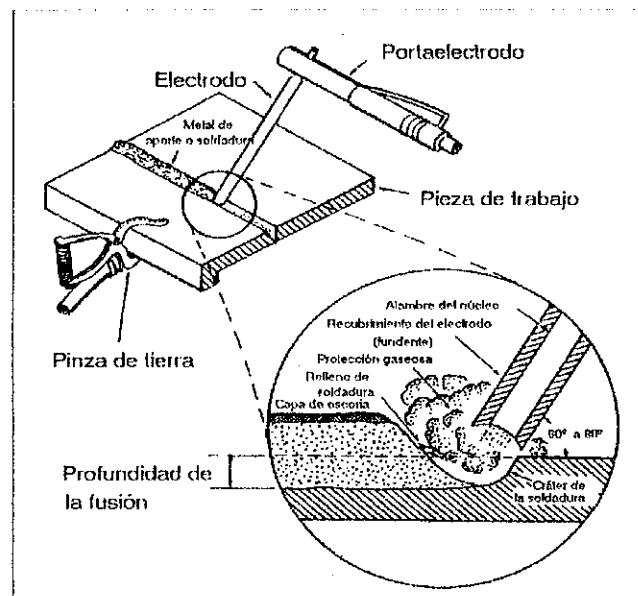
Todos los aceros son soldables siempre que se apliquen el procedimiento, la técnica, y el equipo adecuados. En ocasiones fracasa el intento de soldar estos metales porque se ha pasado por alto uno de estos tres factores. Si el ingeniero y el soldador comprenden la composición, la estructura y propiedades de un acero, así como los efectos que ocasiona el calor en dicho metal, estarán en posibilidad de diseñar y hacer mejores soldaduras en los aceros. Esto pone de relieve la estrecha relación que existe entre la metalurgia de un acero y su soldabilidad

1. ARCO MANUAL

1.1 Descripción del proceso

El sistema de soldadura Arco manual, se define como el proceso en que se unen dos metales mediante una fusión localizada, producida por un arco eléctrico entre un electrodo metálico y el metal base que se desea unir. La soldadura al arco se conoce desde fines del siglo pasado; en esa época se utilizaba una varilla metálica descubierta que servía de metal de aporte. Pronto se descubrió que el oxígeno y el nitrógeno de la atmósfera eran causantes de fragilidad y poros en el metal soldado, por lo que al núcleo metálico se le agregó un revestimiento que al quemarse se gasificaba, actuando como atmósfera protectora, a la vez que mejora notablemente otros aspectos del proceso.

Figura 1. Proceso de soldadura por arco



Fuente: Henry Horwitz. Soldadura y aplicaciones. Página 6.

Un electrodo consiste en un núcleo o varilla metálica, rodeado por una capa de revestimiento. El núcleo es transferido hacia el metal base a través de un arco eléctrico generado por la corriente de soldadura. El revestimiento es el conjunto de elementos minerales y orgánicos que determinan características mecánicas y químicas del depósito.

El revestimiento tiene que cumplir con las siguientes funciones:

- Producción de gases protectores y gases ionizantes.
- Producir escoria para proteger a la soldadura mientras ésta se enfría.
- Suministra materiales desoxidantes, elementos de aleación y hierro en polvo.

1.2 Clasificación de los electrodos: AWS-ASTM

1.2.1 Electrodo para soldar acero dulce

Esta clasificación está formada por una serie de cuatro o cinco dígitos que lleva como prefijo la letra E. Ejemplo:

E XX XX
a b c d

- a) Prefijo E, cuyo significado es de electrodo.
- b) Resistencia mínima a la tensión en miles de libras por pulgada cuadrada.
- c) Posición para soldar: 1- Posición plana, vertical, horizontal, sobrecabeza. 2- Posición plana y horizontal. 3- Únicamente posición plana.
- d) Tipo de corriente, revestimiento del electrodo, polaridad para usar y posición para soldar (ver la tabla I, página 3).

Tabla I. Interpretación del último dígito en la clasificación AWS

AWS-ASTM	Tipo de revestimiento	Corriente y polaridad	Posición a soldar
E XX 10	Celulósico Sódico	CC,EP	P.V.SC.H
E XX 10	Celulósico 10% HP aprox.	CC,EP	P.V.SC.H
E XX 11	Celulósico Potásico	CA,CC,EP	P.V.SC.H
E XX 12	Rutílico Sódico	CA,CC,EN	P.V.SC.H
E XX 13	Rutílico Potásico	CA,CC,AP	P.V.SC.H
E XX 14	Rutílico 20% HP aprox.	CA,CC,AP	P.V.SC.H
E XX 16	Rutílico Potásico B.H.	CA,CC,EP	P.V.SC.H
E XX 18	Rutílico Potásico BH-HP	CA,CC,EP	P.V.SC.H
E XX 20	Oxido de hierro	CA,CC,AP	P.H.Filete
E XX 24	Rutílico 35% HP	CA,CC,AP	P.H.Filete
E XX 27	Oxido de hierro H.P	CA,CC,AP	P.H.Filete

Nomenclatura:

- H.P Hierro en polvo.
- B.H Bajo Hidrógeno
- C.C Corriente continua
- C.A Corriente alterna
- E.P Electrodo positivo
- E.N Electrodo negativo
- A.P Ambas polaridades
- P Plana
- V Vertical
- H Horizontal
- SC Sobrecabeza

1.2.2 Electrodo de baja aleación

Se especifican por el número AWS seguido por una letra que indica el elemento de aleación.

Tabla II. Designación AWS de los principales elementos de aleación

Número del sufijo para electrodos según AWS	% de Aleación				
	(Mo)	(Cr)	(Ni)	(Mn)	(Va)
A1	0.5				
B1	0.5	0.5			
B2	0.5	1.25			
B3	1.0	2.25			
B4	0.5	2.0			
C1			2.5		
C2			3.5		
C3				1.5	
D1	0.3		1.0		
D2	0.3			1.75	
G*	0.2	0.3	0.5	1.0	0.1

G* Sólo necesita tener un porcentaje mínimo de uno de los elementos

Fuente: INDURA. Manual de Soldadura. Página 7.

Por ejemplo: El electrodo 7018 A1, deja depósitos de soldadura cuya resistencia a la tracción es de 70,000 lb/plg² [4,931 kg/cm²]. Se puede soldar en todas posiciones, tiene un revestimiento rutilico-potásico y bajo en hidrógeno; conteniendo además un 0.5% de molibdeno en la aleación.

La creciente utilización de los aceros aleados de alta resistencia ha iniciado el desarrollo de electrodos capaces de producir depósitos de soldadura con resistencia a la tensión superior a las 100,000 lb/plg² [7,045 kg/cm²].

Las propiedades mecánicas de esta magnitud se logran mediante el uso de un acero aleado como alambre de núcleo del electrodo. En la mayoría de los diseños, el recubrimiento del electrodo es de naturaleza a la cal y ferrítica, típica de los tipos de bajo hidrógeno, y con frecuencia contiene hierro pulverizado. Por esta razón, los electrodos de alta resistencia a la tensión tienen generalmente una clasificación de cuatro o cinco dígitos como E-XX15, E-XX16, E-XX18.

1.2.3 Electrodo para aceros inoxidables

La American Welding Society (AWS) ha establecido un sistema de clasificación que utiliza como base la denominación AISI (American Iron and Steel Institute). Los tres primeros dígitos designan la clasificación de acuerdo a su composición química y los dos últimos, separados por un guión indican el tipo de revestimiento y características de empleo. En los casos en que aparezca la letra "L", indica bajo contenido de carbono en el depósito. En este caso, la norma AWS exige un máximo de 0.04% de carbono, industrialmente se utiliza un máximo de 0.03%.

Para determinar el tipo y diámetro de electrodo es importante conocer los factores que intervienen en las condiciones de servicio, éstos son:

- 1- Composición química del metal base.
- 2- Dimensiones de la sección a soldar.
- 3- Tipo de corriente disponible.
- 4- Posición de soldadura.
- 5- Propiedades específicas que se requieren (resistencia a la corrosión, resistencia mecánica, etc.)
- 6- Norma o especificaciones especiales que debe cumplir la soldadura, etc. Los procedimientos de soldadura en aceros inoxidables deben tener en cuenta los factores mencionados anteriormente, como también tener presentes las diferencias de

propiedades que existen entre los aceros corrientes y los inoxidable. Estos últimos, presentan menor punto de fusión, mayor resistividad eléctrica, menor conductividad térmica y coeficientes de expansión de un 50% mayor que los aceros al carbono. Esto se traduce en que el electrodo seleccionado sea compatible con el metal base, lo que significa que el metal depositado debe presentar buena resistencia al agrietamiento, propiedades de corrosión, tenacidad y resistencia óptimas, éstas últimas tienen que ser por lo menos igual al metal base.

1.3 Sistema de clasificación según AWS

	<u>AWS</u>	<u>Ejemplo</u>
➤ Electrodo recubierto para soldar acero al carbono.	A.5.1-78	E-6010, E-6011
➤ Electrodo recubierto para soldar acero inoxidable.	A.5.4-78	E-308L, E-316-16
➤ Electrodo recubierto para soldar aceros de baja aleación.	A.5.5-69	E-7011-A.1, E-9016-B3
➤ Electrodo para revestimientos duros.	A.5.13-70	R-Co-Cr-A, R-Co-Cr-C
➤ Electrodo con fundente en el núcleo de acero al carbono.	A.5.21-70	E-70 T-4, E-70 T-G
➤ Electrodo con fundente en el núcleo de acero inoxidable.	A.5.22-74	E-308L T-1
➤ Alambre desnudo de acero al carbono para usar con protección gaseosa.	A.5.18-79	ER-70S-6, ER-70S-3

1.4 Clasificación de los electrodos según el tipo de metal en que se aplican

- 1- Electrodos para acero dulce: Construidos básicamente por electrodos con núcleo de acero dulce y revestimientos del tipo celulósicos, rútilicos y minerales. Estos electrodos son más usados en aplicaciones normales y estructurales.
- 2- Electrodos para acero de baja aleación: Producen depósitos que pueden contener hasta 2% de elementos de aleación.
- 3- Electrodos para acero dulce y baja aleación con bajo contenido de hidrógeno: Producen depósitos que pueden contener hasta 3.5% de elementos de aleación. Los de revestimiento con bajo contenido de hidrógeno tienen una humedad máxima del 0,02%.
- 4- Electrodos de acero inoxidable: Son utilizados para soldar acero de alta aleación, aceros inoxidables serie 300, 400, 500. Caracterizados por su alto contenido de cromo y níquel.
- 5- Electrodos para hierro fundido: Con núcleo de níquel, núcleo de acero y alto en níquel, con núcleo de acero dulce, con núcleo de bronce y fosfórico.
- 6- Electrodos para cortar y biselar: Se utilizan tanto en aceros como en metales no aptos para corte oxigas: acero inoxidable, hierro fundido, etc.
- 7- Electrodos para recubrimientos duros: Utilizados tanto para la recuperación de piezas desgastadas como en protección de piezas nuevas. Imparten propiedades especiales, tales como resistencia al desgaste, abrasión, impacto y corrosión.

1.5 Clasificación de los electrodos según su revestimiento

- Celulósicos: Se caracterizan por su alto contenido de celulosa en el revestimiento, la cual produce una máxima penetración, solidificación rápida, buenas características de resistencia, elasticidad y ductilidad, así como una presentación rugosa. La AWS los clasifica como: E-6010, E-8010, E-6011.

- **Rutilicos:** Su alto contenido de rutilo (óxido de titanio) en el revestimiento, produce una penetración mediana, arco suave, buena presentación en el cordón de soldadura, buenas características de resistencia, elasticidad y ductilidad. Entre los electrodos que poseen este tipo de revestimiento tenemos:

<u>Bajo hidrógeno o básicos</u>	<u>Aceros inoxidables</u>	<u>Rutilicos</u>
AWS E-7016	AWS E-308-16	AWS E-6012
AWS E-7018	AWS E-312-16	AWS E-6013
AWS E-7018 A1	AWS E-316-16	AWS E-7014
AWS E-11018-M	AWS E-410-16	AWS E-7024
	AWS E-502-16	

- **Mínerales:** Los principales componentes del revestimiento de estos electrodos son: óxidos de hierro y manganeso. Estos componentes producen en el cordón de soldadura buena penetración, buena apariencia del depósito, buenas propiedades mecánicas, alta velocidad de deposición. Entre los electrodos que poseen este tipo de revestimiento tenemos según la AWS: E-6020, E-6027.

1.6 Almacenamiento de los electrodos

Todos los revestimientos de electrodos contienen H₂O; algunos tipos como los celulósicos requieren un contenido mínimo de humedad para trabajar correctamente (4% para un AWS E-6010). En otros casos, como los de bajo hidrógeno, requieren niveles bajísimos de humedad; 0.4% para la serie 70 (ej: 7018), 0.2% para la serie 80 (ej. 8018), 0.15% para la serie 90, 100, 110 y 120 (ej: 9018, 10018, 11018, 12018).

Este tema es de particular importancia cuando se trata de soldar aceros de baja aleación y alta resistencia, aceros templados y revenidos o aceros al carbono manganeso en espesores gruesos. La humedad del revestimiento aumenta el contenido de hidrógeno en el metal de soldadura y de la zona afectada térmicamente (ZAT). Este fenómeno

puede originar fisuras en aceros que presentan una estructura frágil en la zona afectada térmicamente (ZAT), como los mencionados anteriormente.

Para evitar que esto ocurra, se deben emplear electrodos que aporten la mínima cantidad de hidrógeno (electrodos bajo hidrógeno ej: 7018), además un procedimiento de soldadura adecuado para el material base y tipo de unión (precalentamiento y/o post-calentamiento, según sea el caso).

De todo lo anterior se puede deducir fácilmente la importancia que tiene el buen almacenamiento de los electrodos. De ello depende que los porcentajes de humedad se mantengan dentro de los límites requeridos y así el electrodo conserve las características necesarias para producir soldaduras sanas y libres de defectos. Como las condiciones de almacenamiento y reacondicionamiento son diferentes para los diversos tipos de electrodos, hemos agrupado aquellos cuyas características son semejantes, a fin de facilitar la observación de estas medidas. A continuación se definirán tres conceptos, los cuales son muy importantes para almacenar adecuadamente los electrodos:

- **Condiciones de almacenamiento:** Son aquéllas que se deben observar al almacenar electrodos en cajas cerradas. En la Tabla III se dan las recomendaciones para el acondicionamiento de depósitos destinados al almacenamiento de electrodos.
- **Condiciones de mantenimiento:** Son las condiciones que se deben observar una vez que los electrodos se encuentran fuera de sus cajas. En la Tabla III se indican estas condiciones.
- **Reacondicionamiento o resecado:** Aquellos electrodos que han absorbido humedad más allá de los límites recomendados por la norma, requieren ser reacondicionados, a fin de devolver a los electrodos sus características. En la Tabla IV se indican las recomendaciones para el reacondicionamiento de electrodos. La operación de resecado no es tan simple como parece; debe realizarse en hornos con circulación de aire. En el momento de introducir los electrodos en el horno, la temperatura del

mismo no debe superar los 100⁰C y las operaciones de calentamiento y enfriamiento deben efectuarse a una velocidad de alrededor de 200⁰C/hr, para evitar la fisuración y/o fragilización del revestimiento. En la tabla V hay algunas recomendaciones sobre el uso de los electrodos de bajo hidrógeno.

Tabla III. Condiciones de almacenamiento y mantenimiento de electrodos

Electrodo		Acondicionamiento del depósito (en cajas cerradas)	Mant. de electrodos en estufas (cajas abiertas)
Clase	Tipo		
E-6010 E-6011	Celulósico Celulósico	Temperatura ambiente	No recomendado
E-XX12 E-WW13 E-XX14 E-XX24	Rutílico Rutílico	Temperatura de 20 °C más alta que la temperatura ambiente, pero menor que 60 °C o humedad relativa ambiente menor que 50%.	De 10 °C a 20 °C sobre la temperatura ambiente.
E-XX15 E-XX16 E-XX18 E-XX28 E-XX48 Inox. E-70/E-130	Básico Básico Básico (Fe) Básico (Fe) Básico (Fe) Rutílico Básico	Temperatura de 20 °C más alta que la temperatura ambiente, pero menor que 60 °C o humedad relativa ambiente menor que 50%.	De 30 °C a 140 °C sobre la temperatura ambiente.

Fuente: INDURA. Manual de Soldadura. Página 15.

Tabla IV. Recomendaciones para el resecado de electrodos

Electrodo	Aplicación	Resecado
Celulósicos (EXX10- EXX11)	Todas	No requieren, si han estado bien acondicionados. Por lo general no pueden resecarse sin deteriorar sus características operativas.
Rutílicos (EXX12- EXX13) (EXX14- EXX24) Inoxidables austeníticos.	Todas	No requieren si han estado bien acondicionados. Caso contrario resecar de 30 a 120 minutos entre 100-150 °C . Asociar la menor temperatura con el mayor tiempo. Durante el resecado ensayar en soldadura para comprobar características operativas y enviar sobreseca
Básicos de bajo contenido de hidrógeno. (EXX15- EXX16) (EXX18- EXX28) Incluyen baja aleación (AWS-A5.5) Inoxidables martensíticos y ferríticos (E4XX).	Donde se requiere bajo contenido de hidrógeno en el metal depositado.	Cuando el electrodo permaneció más de 2 horas sin protección especial, resecar de 60 a 120 minutos entre 250-400 °C. No exceder los 400 °C, y si se seca a 250 °C hacerlo durante 120 minutos.
	Aplicaciones críti- cas (aceros de alto contenido de car- bono, de baja aleación, aceros de más de 60 kg/mm ² de resistencia).	Siempre antes de usar se resecan de 60 a 120 minutos entre 300-400 °C. No exceder los 400 °C, y si se seca a 300 °C hacerlo durante 120 minutos. Luego conservar en estufa hasta el momento de soldar.

Fuente: INDURA. Manual de Soldadura. Página 15.

Tabla V. Recomendaciones para el uso de electrodos de bajo hidrógeno

Aplicación	Recomendación
<p>Para soldadura normal de bajo contenido de hidrógeno, con control razonable de nivel de hidrógeno y precauciones rutinarias de calor aportado y precalentamiento.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Electrodos en envases no herméticos o dañados, y electrodos que han sido expuestos a atmósfera normal por más de 2 horas deben ser resecados antes de usarlos. 2. Electrodos en envases no herméticos pueden usarse sin resecar para soldadura de aceros de menos de 50 kg/mm² de resistencia en situaciones de bajo embridamiento o cuando la experiencia muestra que no ocurren fisuras. 3. Los electrodos deben mantenerse en termos entre 30 °C–140 °C sobre la temperatura ambiente.
<p>Para soldadura crítica de bajo contenido de hidrógeno, con extremo control de nivel de hidrógeno. En estructuras importantes y materiales de alto carbono o baja aleación con resistencia mínima mayor de 50 kg/mm².</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Siempre deben resecarse los electrodos antes de usar. 2. Los electrodos deben mantenerse en termos entre 30 °C–140 °C sobre la temperatura ambiente. 3. Los electrodos resecados expuestos por más de 1 hora a atmósfera normal deben volver a resecarse.
<p>Para soldadura general donde se usan los electrodos por sus buenas propiedades mecánicas o calidad radiográfica, pero no se requiere un nivel bajo de hidrógeno en el metal depositado.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Los electrodos pueden utilizarse directamente a partir de cualquier tipo de envase, siempre que hayan permanecido almacenados en buenas condiciones.

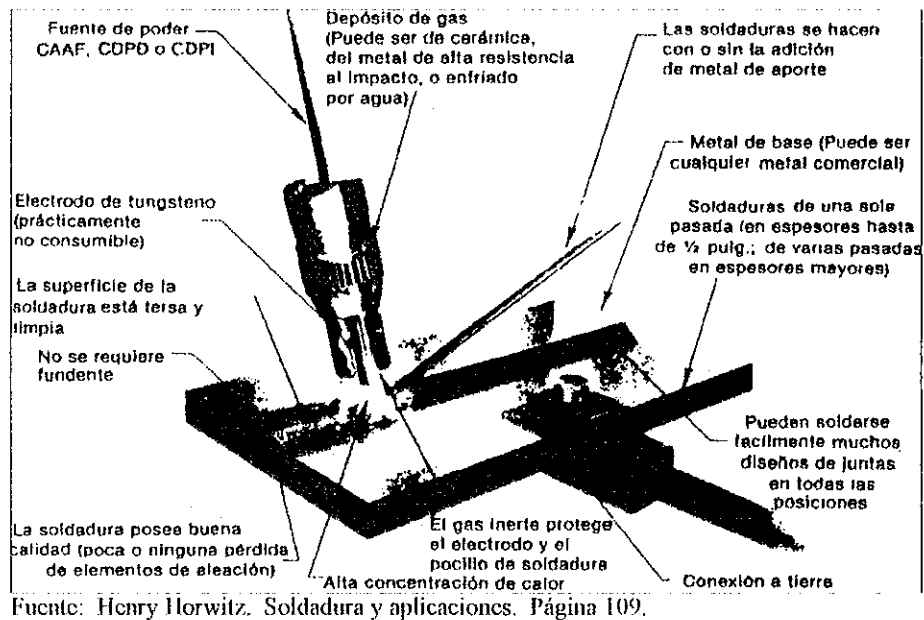
Fuente: INDURA. Manual de Soldadura. Página 15.

2. SISTEMA DE SOLDADURA GTAW

El proceso de soldadura GTAW también conocido como TIG, es un proceso de soldadura donde se establece un arco eléctrico entre un electrodo de tungsteno prácticamente inconsumible, y una atmósfera protectora de gas inerte suministrada en forma externa, generalmente de helio, argón o una mezcla de ambos.

La alta densidad de corriente eléctrica producida por este proceso hace posible soldar a mayores velocidades, y obtener mayor penetración, que con la soldadura a gas combustible o con la de arco metálico protegido. Pueden hacerse soldaduras de calidad excepcional con este proceso, pero todo depende del ajuste del equipo y de la apropiada preparación del metal de base.

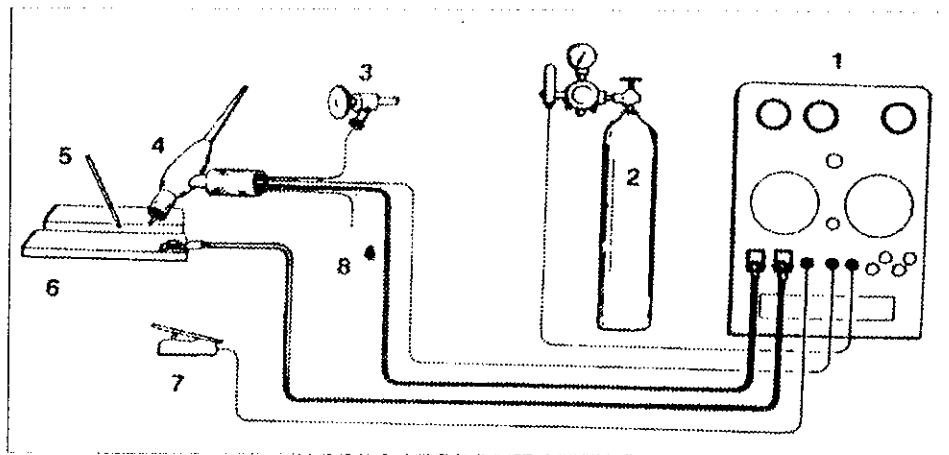
Figura 2. Aspectos esenciales del proceso GTAW



Las máquinas que van a utilizarse en el proceso tienen que tener características especiales diferentes a las máquinas de soldadura eléctrica al arco, en cuanto a voltaje y amperaje se refiere. Se puede utilizar una máquina generadora de combustión interna accionada por diesel o gasolina, una transformadora o una rectificadora si se utiliza corriente directa con las dos polaridades, por ejemplo, para soldar aluminio (CA ó CC+), y para acero inoxidable (CC-).

Generalmente las máquinas para soldar con este proceso son rectificadoras basadas en la técnica de convertidor CD. Con estas técnicas, se reduce el consumo energético, el peso y las dimensiones de los equipos convencionales. Con la avanzada electrónica controlada por microprocesadores, se obtienen, entre otras ventajas, rapidez en la regulación y excelentes características en la soldadura.

Figura 3. Equipo para el sistema GTAW



Fuente: INDURA. Manual de Soldadura. Página 19.

- 1- Fuente de poder de corriente alterna y continua, con unidad de alta frecuencia incorporada.
- 2- Gas de protección.
- 3- Suministro de agua (enfriamiento de pistola).
- 4- Pistola.
- 5- Material de aporte.
- 6- Material base.
- 7- Control remoto de pedal (optativo).
- 8- Drenaje de agua.

La técnica del convertidor se basa en el principio siguiente: El equipo está compuesto por un rectificador, un inversor, un transformador, un inductor y la unidad de control. El primer paso es la rectificación de la corriente primaria para después convertirla en una frecuencia muy alta en un módulo de transistores, después se transforma la corriente a un nivel adecuado para la soldadura, se rectifica la corriente, pasa por un inductor que la equilibra y se controla al final por la electrónica basada en microprocesadores.

2.1 Ventajas y aplicaciones

Ventajas:

- Produce una soldadura de alta calidad, superior a una similar con electrodo manual.
- Es aplicable a casi todos los metales utilizados en la industria.
- No hay salpicaduras, chispas, ni emanaciones, al no circular metal de aporte a través del arco.
- No se requiere fundente, no hay necesidad de limpiar posteriormente la soldadura, ni posibilidad de atrapamiento de escoria.
- Se puede soldar en toda posición.
- La distorsión es mínima, debido al calor concentrado del arco.

Aplicaciones:

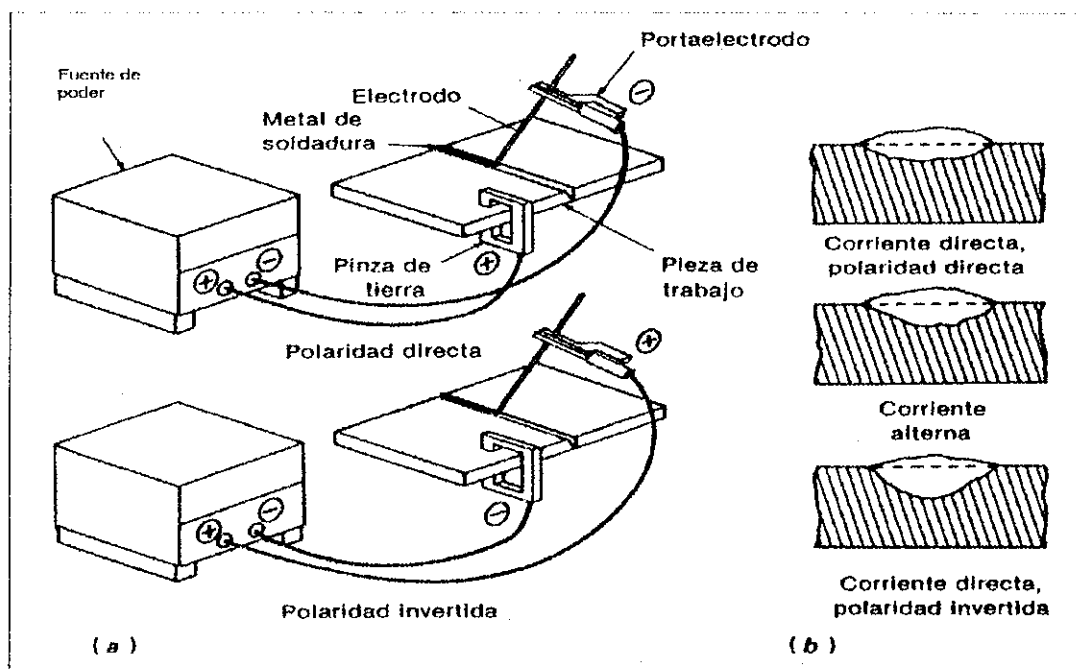
- ◆ Este sistema puede ser aplicado casi a cualquier tipo de metal como: aluminio, acero inoxidable, acero dulce, hierro fundido, cobre, níquel, magnesio, etc.
- ◆ Es especialmente apto para unión de metales de espesores delgados, desde 0.5 mm, debido al control preciso del calor del arco y la facilidad de aplicación con o sin metal de aporte.
- ◆ Se utiliza también en unión de espesores mayores, cuando se requiere de calidad y buena terminación de la soldadura.

- ◆ Se puede utilizar para aplicaciones de recubrimientos duros de superficie y para realizar cordones de raíz en cañerías de acero al carbono.
- ◆ En soldaduras por Arco pulsado, suministra mayor control del calor generado por el arco en piezas de espesores muy delgados y soldaduras en posición.
- ◆ Para soldadura de cañería, es ventajosa la combinación: cordón de raíz Tig (tungsteno y gas inerte) y el resto de pases Mig (metal y gas inerte) o arco manual.

2.2 Soldadura aplicada con corriente continua

Al soldar con corriente continua, el circuito puede conectarse ya sea en: polaridad directa (electrodo negativo), o polaridad invertida (electrodo positivo).

Figura 4. Comparación entre la polaridad directa y la polaridad invertida



Fuente: Henry Horwitz. Soldadura y aplicaciones. Página 119.

Con la corriente continua y polaridad directa los electrones circulan desde el electrodo al metal base produciendo no sólo un calentamiento en la pieza, sino una soldadura angosta y alta penetración.

Por regla general, los metales férricos y cúpricos deben soldarse en corriente continua, polaridad invertida al electrodo de Tungsteno. En este caso, una adición de 1 a 3% de Thorio en la composición del electrodo, facilitará su poder emisor y el cebado del arco por ionización de la atmósfera gaseosa que rodea al electrodo. En la polaridad invertida los electrones circulan desde el metal base al electrodo, siendo necesario utilizar electrodos de mayor diámetro ya que esto hace que el electrodo absorba una gran cantidad de calor y por consiguiente, funde su extremo produciendo soldaduras anchas y de baja penetración.

2.3 Soldadura aplicada con corriente alterna

Teóricamente, la soldadura con corriente alterna es una combinación de soldadura con CCPD y CCPI. En cada aciclo, la CCPI "abre" la capa de óxido superficial, mientras que el semi-ciclo correspondiente a CCPD produce la fusión.

Al soldar con CA, se intercala en la corriente de soldadura otra adicional, de alta tensión, alta frecuencia y baja intensidad, para obtener un arco estable. La corriente de alta frecuencia superpuesta a la corriente de soldadura permitirá el cebado del electrodo con una simple aproximación, sin ser necesario que entren en contacto el electrodo y la pieza. Igualmente se produce otro efecto que estabiliza el arco, evitando las interrupciones del mismo que se producirían cada vez que la corriente alterna de soldadura pasara por el valor cero (es decir 100 veces por segundo con corriente normal de 50 Hz.). La corriente alterna se emplea para el aluminio, el magnesio y sus aleaciones, así como para los cupro-aluminios, donde es necesario romper la capa de

óxido susceptible de formarse en la superficie del baño de fusión; con la corriente alterna se logra una penetración media.

2.4 Electrodo para el sistema GTAW

Los electrodos utilizados para este sistema están fabricados con tungsteno o aleaciones de tungsteno, lo que los hace prácticamente no consumibles, ya que su punto de fusión es sobre los 3800 °C; su identificación se realiza por el color de su extremo.

Tabla VI. Identificación de los electrodos de Tungsteno

<i>Tipos de electrodos</i>	<i>Identificación</i>	<i>Clasif. AWS-ASTM</i>
Electrodo de tungsteno puro	Punto verde	EWP
Electrodo de tungsteno-torio (1% Th)	Punto amarillo	EWTh - 1
Electrodo de tungsteno-torio (2% Th)	Punto rojo	EWTh -- 2
Electrodo de tungsteno-zirconio	Punto café	EWZr

Fuente: INDURA. Manual de Soldadura. Página 22.

Los diámetros más utilizados: 1.6 mm (1/16"), 2.4 mm (3/32"), 3.2 mm (1/8"). La adición de 2% de torio permite una mayor capacidad de corriente, mejor iniciación y estabilidad del arco.

Tabla VII. Cuadro de selección de electrodos

<i>Material</i>	<i>Tipo de corriente</i>	<i>Penetración</i>	<i>Gas</i>	<i>Electrodo</i>
Aluminio	CAAF	Media	Argón	W
Acero inox.	CCEN	Alta	Argón	W - Th
Acero dulce	CCEN	Alta	Argón o Helio	W - Th
Cobre	CCEN	Alta	Argón o Helio	W - Th
Niquel	CCEN	Alta	Argón	W - Th
Magnesio	CAAF	Media	Argón	W

Nota: CCAF = corriente alterna y alta frecuencia

W = Tungsteno

CCEN = corriente continua, electrodo negativo

W - Th = Tungsteno-Torio

Los electrodos de tungsteno necesitan de cierta preparación antes de comenzar a soldar con ellos. Esta preparación dependerá del tipo de corriente que se esté utilizando y del tipo de material a soldar.

Para soldadura con CCPD, el extremo del electrodo se lleva a un *punto* mediante un esmeril para evitar contaminación del electrodo. Debe de aguzarse el electrodo dándole un angulo de 30° y dejándole un largo a la punta aguzada de $2 \frac{1}{2}$ diámetros del electrodo que se esté utilizando.

En corriente alterna, CA, el extremo del electrodo es aguzado a un angulo de 45° para luego dejarlo como a un tamaño cercano a la mitad del diámetro original del electrodo.

2.5 Varillas para el sistema GTAW

Entre el material de aporte utilizado para este sistema tenemos una gran variedad, cada una de ellas con diferente composición química y diferente aplicación. Según como las clasifica la AWS entre ellas tenemos:

ER 1100: Para usos generales en industria de alimentos, lácteos, refrigeración, unión, relleno y reparación de planchas y piezas de aluminio fundido.

ER 4043: Blocks y cárters de aluminio, envases y coladores químicos. Especialmente indicado para trabajos en los cuales se desconoce la composición química del metal base, así como aluminio de calidad 2014, 3003, 6061, 4042.

ER 308L: Para soldadura de aceros inoxidable tipo: 308L, 304L, 308, 321, 347. Además para equipos de procesos y almacenamiento de productos alimenticios y químicos, bombas, intercambiadores de calor.

ER 316L: Diseñado especialmente para soldar aceros inoxidable austeníticos tipo 316L, 316, 318. Usados en la industria alimenticia, de papel, turbinas, bombas. Se recomienda especialmente para aplicaciones resistentes a la corrosión cuando hay posibilidades de picadura (ataque por ácido).

E 70S – 6: Es un electrodo continuo de acero dulce, con alta cantidad de elementos desoxidantes. El diámetro de 1/16", es ideal para soldadura de acero dulce, reparación y relleno de ejes, soldadura de cañerías.

ER 80S – B₂L: Se recomienda para soldar tuberías y en construcción de calderas. Es resistente al calor y la corrosión. Al soldar aceros de composición química semejante, se recomienda precalentamiento de 260 – 300 °C.

ER 80S – B₃L: Diseñado especialmente para soldar aceros al carbono – molibdeno, estabilizado con cromo. Resistente al calor y la corrosión. Al soldar aceros de composición química semejante, se recomienda precalentamiento de 260 – 300 °C.

2.6 Gases de protección

El propósito principal de un gas de protección es el de proteger el metal fundido contra la contaminación de oxígeno, nitrógeno e hidrógeno, gases que existen en el aire; los gases de protección son materiales consumibles que se utilizan en los procesos de soldadura con arco de tungsteno y gas y de soldadura con arco metálico y gas. Aunque en teoría puede usarse cualquiera de los gases inertes, helio, argón, neón, xenón o

kriptón, los únicos de los que puede disponerse en volumen suficiente para los usos prácticos en la soldadura son el helio y el argón. Estos gases dan resultados satisfactorios de protección para los metales más reactivos, tales como el aluminio, el magnesio, el berilio, el columbio, el tántalo, el titanio y el circonio. Comúnmente se emplea argón, helio, o una mezcla de estos dos gases; cada uno de estos gases tiene ciertas características que son beneficiosas para la soldadura.

Argón: 1- Acción uniforme y silenciosa sobre el arco. 2- Bajo voltaje de arco a un valor de corriente dado, baja entrada de calor. 3- Útil en soldadura de materiales delgados. 4- Buena acción limpiadora en arco de C.A sobre aluminio. 5- Excelente para trabajo en posición.

Helio: 1- Gas más liviano que el argón. 2- Útil para soldar materiales gruesos y metales con alta conductividad térmica. 3- Menor efecto limpiador. 4- Mayor costo.

3. ACEROS

Hay diferentes organizaciones que publican especificaciones y designaciones para aceros al carbono y aleados. Una de las más ampliamente utilizadas es la AISI – SAE. Este sistema está basado en designar un acero de acuerdo a su composición química, y para ello la AISI – SAE tiene una designación típica de cuatro dígitos, los cuales significan lo siguiente:

- ◆ Los primeros dos dígitos indican los principales elementos aleantes en el acero.
- ◆ Los otros dos dígitos indican el contenido nominal de carbono en 1/100 de porcentaje.

Tabla VIII. Principales elementos aleantes en los aceros

Dígitos	Tipos de acero	Contenido nominal de aleación (%)
10XX	Acero al carbono	1.0 Mn, máximo
13XX	Acero al manganeso	1.75 Mn
23XX	Acero al níquel	3.5 Ni
25XX	Acero al níquel	5.0 Ni
31XX	Acero al Ni-Cr	1.25 Ni, 0.65 – 0.80 Cr
32XX	Acero al Ni-Cr	1.75 Ni, 1.07 Cr
40XX	Acero al molibdeno	0.2 – 0.25 Mo
41XX	Acero al Cr-Mo	0.5 – 0.95 Cr, 0.12 – 0.30 Mo
50XX	Acero al cromo	0.27, 0.4, 0.5 – 0.65 Cr
61XX	Acero al Cr-V	0.6 – 0.95 Cr, 0.1 – 0.15 V

Fuente: Aaron D. Deutschman. Diseño de Máquinas. Página 79.








El acero al carbono se define como el acero que contiene menos de 1.65% de manganeso, 0.6% de silicio, 0.6 de cobre. También se clasifican en aceros bajo en carbono (0 – 0.15% de carbono), acero al carbono (0.15 – 0.29% de carbono), acero medio en carbono (0.3 – 0.59% carbono), aceros con alto contenido de carbono (0.6 – 1.7% de carbono).

3.1 Propiedades físicas y mecánicas

La utilidad de un material o aleación se mide y describe por sus propiedades tanto físicas como mecánicas, y para ello se efectúan ensayos destructivos, tales como el ensayo de dureza, tensión, compresión, torsión, etc.

Dureza: Probablemente la propiedad más comúnmente medida es la dureza. La dureza de un material es básicamente su resistencia a la indentación o penetración y representa, en la práctica, una indicación de la resistencia de un material. Se dispone de diferentes equipos para obtener con precisión la medición de la dureza de cualquier perfil de un material; entre estos equipos tenemos los probadores de dureza *Brinell*, *Rockwell*, *Vickers* y el *escleroscopio Shore*.

Figura 5. Ensayos de dureza de uso comercial

ENSAYOS DUREZA DE USO COMERCIAL		
TEST	PENETRADOR	FORMA DE LA HUELLA
Brinell	Esfera de carburo de Tungsteno de 10mm.	
Vickers	Diamante Piramidal	
Knoop microdureza	Diamante Piramidal	
Rockwell		
A 60kg.	Cono	
C 15 kg.	Diamantado	
D 100 kg.		
E 100 kg.	Esfera de acero de 1/16"	
F 60 kg.		
G 80 kg.		
H 100 kg.	Esfera de acero de 1/8"	
K 150 kg.		

Fuente: INDURA. Manual de Soldadura. Página 28.

La prueba *Brinell* se usa principalmente para materiales cuyo espesor sea $\frac{1}{4}$ de pulgada o más. El número de dureza *Brinell* se calcula dividiendo la carga entre el área indentada. Uno de los tipos más utilizados para medir la dureza es el probador de dureza *Rockwell*, debido a que no se hacen comparaciones con las mediciones en el microscopio y la dureza puede ser leída en una carátula.

Resistencia: La resistencia de un material es la medida de su habilidad para soportar una carga aplicada sin fallar o deformarse significativamente. A mayor carga que el material pueda soportar, más grande es su resistencia. Las medidas de resistencia pueden ser universalmente empleadas, se describen en unidades como lb/plg², ó kg/mm².

Se le conoce también como resistencia última al punto más alto que se tiene en la curva esfuerzo-deformación de un material. El ensayo de tracción determina la resistencia de un material y su ductilidad. La ductilidad de un material es la habilidad para deformarse plásticamente sin fallar. Dos medidas de ductilidad se pueden obtener de un ensayo de tracción:

1. Porcentaje de elongación

$$\% \text{Elongación} = ((\text{Long. Final} - \text{Long. Inicial}) / (\text{Long. Inicial})) * 100$$

2. Porcentaje de reducción de área

$$\% \text{Reducción} = ((\text{área inicial} - \text{área final}) / (\text{área inicial})) * 100$$

Resistencia al Creep: Si se aplica una carga inferior a la resistencia de tracción sobre un material a temperatura ambiente, el material se deforma inicialmente al estar la carga aplicada; y si se mantiene la misma carga provoca nada más que una deformación medible. Pero si esa misma carga fuese aplicada a elevada temperatura, el material continuaría gradualmente deformándose tanto como la carga se mantuviese; este comportamiento se denomina CREEP. Manteniéndose la carga constante,

eventualmente provocará la ruptura del material. Los factores más importantes al describir el *creep* de un material o resistencia de ruptura son: tiempo y temperatura.

Tenacidad: Un material con resistencia y ductilidad normal puede comportarse en forma frágil si se somete a cargas bajo ciertas condiciones, tales como un sistema triaxial de esfuerzos (entalladura), bajas temperaturas o velocidades elevadas de carga o deformación. No es necesario que estos tres factores estén actuando a la vez para que se produzca la fractura frágil. Un estado triaxial de tensiones, como el que existe en una entalladura y una temperatura baja son responsables de la mayoría de las fracturas frágiles producidas en servicio.

Un ensayo común para medir la tenacidad es el llamado *ensayo de Charpy*. Este es un ensayo de choque sobre probeta entallada, es mucho más informativo cuando se realiza sobre un intervalo de temperatura, para poder determinar la temperatura de transición de dúctil a frágil. Esta información es de vital importancia cuando se seleccionan materiales de acuerdo a su tenacidad a la entalla o tendencia a la fractura frágil.

3.2 Aspectos metalúrgicos

Una gran parte de la metalurgia de la soldadura se basa en el cambio de propiedades de los metales, a medida que se calientan. A través de la metalurgia es posible relacionar los cambios de temperatura durante la soldadura que producen un cambio en la estructura y en las propiedades del depósito soldado y del metal base.

3.2.1 Estructura cristalina de los metales

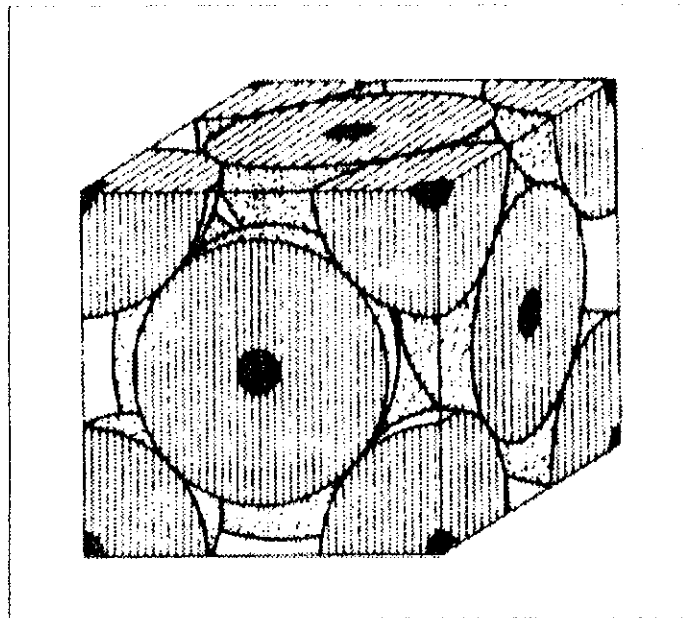
Al fundirse, los átomos de hierro quedan libres para moverse o fluir encima de ellos mismos, pero una vez que comienza el enfriamiento, inmediatamente se ubican en

secuencias definitivas. Este modelo se repite hasta que se interrumpe al pasar a otra secuencia. Estas secuencias se denominan *cristales*.

La colocación atómica es única y se conoce como estructura cristalina celosía espacial, y en el hierro puede tomar una de dos formas:

- ◆ Cristal cúbico centrado en la cara (FCC): Esta colocación particular atómica existe cuando se calienta el hierro por encima de los 900 °C.

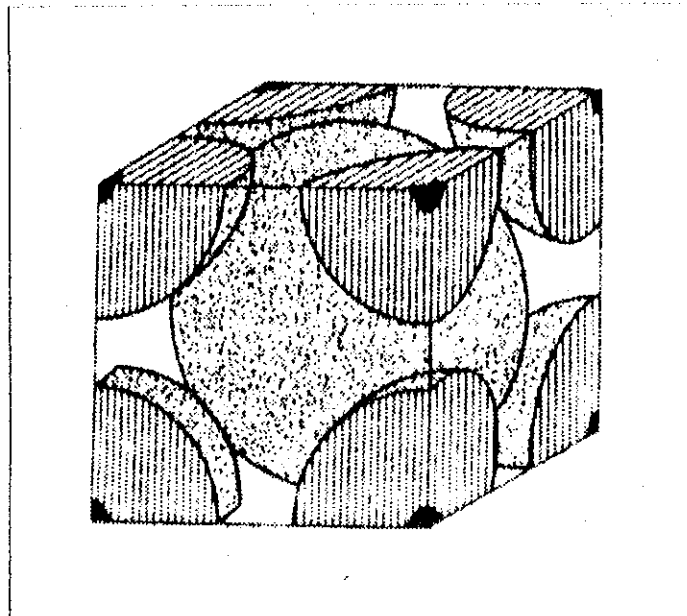
Figura 6. Cristal cúbico (FCC)



Fuente: INDURA. Manual de Soldadura. Página 31.

- ◆ Cristal cúbico centrado en el cuerpo (BCC): Esta es la forma normal que se encuentra en la mayoría de los aceros a la temperatura ambiente.

Figura 7. Cristal cúbico (BCC)



Fuente: IDURA. Manual de Soldadura. Página 32.

Sin embargo en el acero existe el cambio de BCC a FCC y es lo que hace al acero “*Tratable térmicamente*”. Esta habilidad, de existir en más de un tipo de red atómica, se llama “Alotropía”.

Tabla IX. Transformaciones del hierro puro

Mod. Alotrópica	Estructura cristalina	Rango de estabilidad
Hierro Alfa	BCC	910 °C y más abajo
Hierro Gamma	FCC	910 – 1400 °C
Hierro Delta	BCC	1400 – 1535 °C

En los párrafos anteriores, la red de un cristal fue descrita como un compuesto de un solo tipo de átomo. Si existe más de un elemento presente, la situación puede cambiar ligeramente o considerablemente, dependiendo de la identidad de los átomos presentes.

Por ejemplo, si una pequeña cantidad de níquel se agrega al hierro, los átomos de níquel se ubican en algunos lugares de los átomos de hierro en la red cristalina. Esta situación y la estructura se denomina *Solución sólida sustitucional*.

Sin embargo, existe otra situación en la cual los átomos más pequeños no reemplazan a otros átomos y tienden a ubicarse en los puntos intermedios o intersticiales de la red; este tipo de estructura es conocido como *Solución sólida intersticial*. Elementos tales como carbono, hidrógeno y nitrógeno forman soluciones sólidas intersticiales en el hierro.

3.2.2 Diagramas de fase

Ninguno de los metales ferríticos que se usan industrialmente, se emplean en su estado puro. Están aleados, generalmente con diversos elementos, para mejorar sus propiedades básicas.

Un ejemplo claro lo representa el *acero*, pues esencialmente es una aleación de hierro y carbono. Sin embargo, en las aleaciones ocurren eventos tales como cambios de fases y solidificación, los cuales son adecuadamente mostrados en los llamados diagramas de fases. Se considera un diagrama de fase como un mapa caminero en metalurgia, esto debido a que para un sistema de aleación dado, se puede determinar cualquier composición de aleación dada a cualquier temperatura, además de las fases y los porcentajes en que están presentes.

Dentro de los diagramas de fase más importantes y que nos servirá para estudiar la soldabilidad de los aceros tenemos el *diagrama hierro-carbono*.

3.2.2.1 Diagrama hierro-carbono

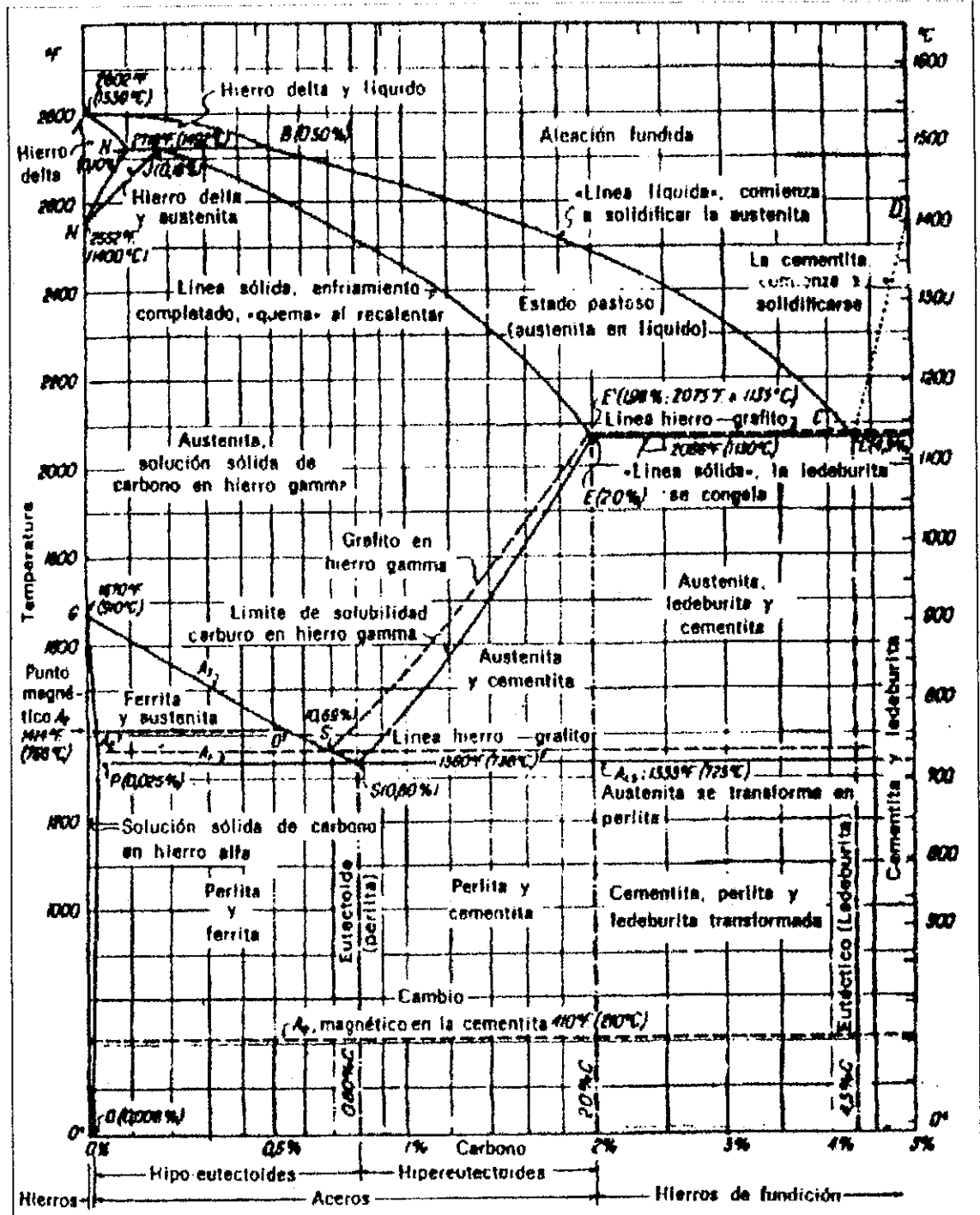
El diagrama de equilibrio hierro-carbono es la representación más importante de un sistema de aleación. Este proporciona un cuadro completo de las relaciones de fase y temperatura para el conocimiento necesario del tratamiento térmico del acero.

En el diagrama se observa que el hierro puro tiene diferentes formas alotrópicas. A la temperatura ambiente, el hierro tiene cuerpo de estructura cúbica centrada que tiene propiedades magnéticas; a esta forma se le llama *hierro alfa*. A medida que la temperatura cambia hasta 767.8 °C, la estructura cristalina permanece sin cambiar, pero el hierro pierde sus propiedades magnéticas. Si se aumenta la temperatura hasta 910 °C el hierro cambia a una estructura cúbica de fase centrada que sigue siendo no magnética.

Esta forma es estable hasta la temperatura de 1400 °C, punto en el cual el hierro toma nuevamente la forma de estructura cúbica centrada y es llamado *hierro delta*. Finalmente cuando la temperatura se aumenta hasta 1539 °C, el hierro delta se funde y se vuelve líquido. Industrialmente el hierro delta tiene muy poca importancia.

El carbón es soluble en el hierro alfa hasta un máximo de 0.025% a 722.7 °C, este hierro alfa es comúnmente llamado *ferrita*, y es el más suave de todos los materiales en el diagrama.

Figura 8. Diagrama hierro-carbono



Fuente: Aaron D. Deutschman. Diseño de Máquinas. Página 32.

A la temperatura de 1130 °C, el carbón es soluble en el hierro γ en un máximo de aproximadamente 2.0 %; comúnmente el nombre dado a esta solución sólida intersticial es *austenita*.

El punto C en el diagrama hierro-carbono es un punto *eutéctico* cuyo contenido de carbón es de 4.3 %, además es una mezcla de austenita y cementita conocida como *ledeburita*. Este material no es observable porque la austenita es inestable a la temperatura ambiente y continúa cambiando con enfriamiento.

Al punto que se intersecta entre la temperatura de 722.8 °C y el 0.8 % de carbón se le llama *eutectoide*, siendo el punto más bajo en el diagrama en el cual la austenita desaparece cuando es enfriada lentamente. El material formado en el punto eutectoide se le llama *perlita*. Este material es una mezcla mecánica de ferrita y cementita. La mezcla vista en un microscopio, se ve como capas laminares de cementita dentro de un campo de ferrita blanca.

3.2.2.1.1 Cambios significativos en el diagrama

1- Transformación de hierro delta-austenita

- a) Esto ocurre a 1390 °C con hierro esencialmente puro; aumenta a un máximo de 1490 °C con aumento de carbono.
- b) El hierro delta no puede existir en aceros sobre 0.5 % de carbono.

2- Transformación austenita-ferrita + Fe₃C

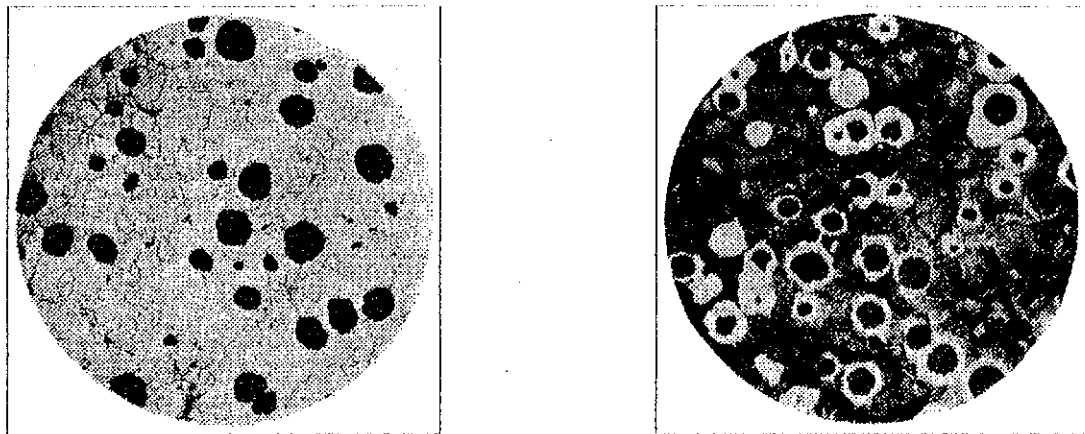
- a) Es la más importante transformación en los aceros, y la base para la mayoría de los tratamientos térmicos.
- b) Esta transformación ocurre especialmente en hierro puro a 910 °C. Con aumento del contenido de carbono, sin embargo, la transformación ocurre sobre un rango de temperaturas. La temperatura superior a este rango varía desde 910 °C hasta 723 °C con aumento de carbono.

- 3- La temperatura más baja del rango se mantiene a 723 °C para todos los aceros.
- 4- La austenita puede disolver hasta un 2.06 % de carbono en solución sólida.

El diagrama de fases indica la naturaleza de las fases presentes en todas las aleaciones de hierro-carbono bajo condiciones de equilibrio, es decir, muy suave calentamiento y enfriamiento. A temperatura ambiente las microestructuras de las aleaciones hierro-carbono en condiciones de equilibrio incluyen uno o más de los siguientes constituyentes:

- 1- Ferrita: Solución sólida de carbono en hierro alfa.
- 2- Perlita: Mezcla de cementita (Fe_3C) y ferrita.
- 3- Cementita: Carburo de hierro en perlita o como cementita masiva en aceros altos en carbono.

Figura 9. Microestructura de la ferrita y perlita
Fuente: Aaron D. Deutschman. Diseño de Máquinas. Página 42.



a) Ferrita

b) Perlita

El acero hipoeutectoide tiene menos del 0.8% C y su estructura consiste en ferrita más perlita. El acero eutectoide tiene 0.8% C y la microestructura es 100% perlita.

El acero hipereutectoide tiene mayor cantidad de carbono que 0.8% C y la estructura consiste en perlita más cementita masiva. Se debe recordar que éstas son estructuras de equilibrio y que el tratamiento térmico está basado en producir estructuras fuera de equilibrio.

3.2.2.2 Diagrama de transformación isotérmica

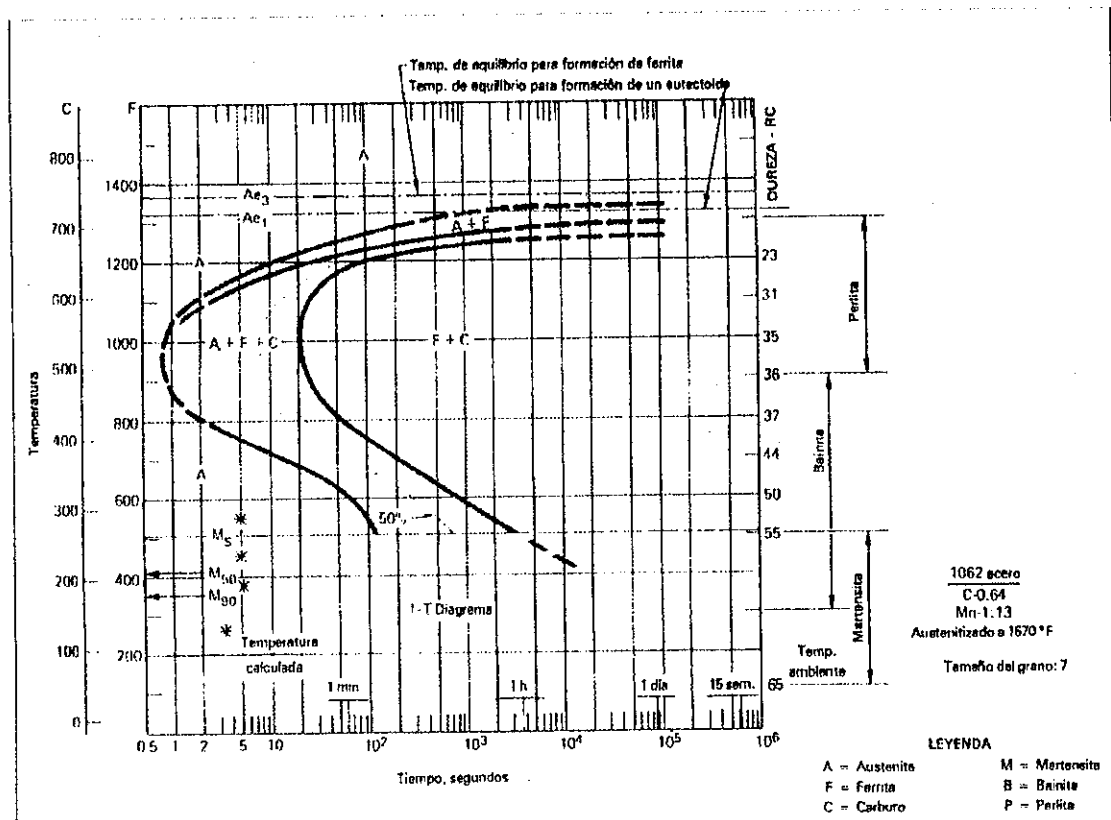
El diagrama hierro-carbono tiene un uso limitado, debido a que no entrega información acerca de la transformación de austenita a estructuras fuera de equilibrio, no suministra detalles de la velocidad o temperatura a las cuales ocurren las transformaciones.

Por lo tanto, son de amplia utilidad, los llamados diagramas isotérmico o T.T.T (tiempo-temperatura-transformación), que permiten determinar velocidad, tiempo y temperatura a las cuales la austenita se transforma a microestructura tales como:

- ◆ Perlita fina
- ◆ Perlita gruesa
- ◆ Bainita
- ◆ Martensita

Estos diagramas se obtienen cortando especímenes pequeños de una barra de acero con un contenido específico o de una aleación determinada. La primera curva S de la izquierda (Figura 10) es donde empieza la transformación y la curva extrema derecha corresponde al final de las transformaciones.

Figura 10. Diagrama de transformación isotérmica para el acero



Fuente: Aaron D. Deutschman. Diseño de Máquinas. Página 47.

El tiempo más corto de iniciación y completado de la transformación está en la "rodilla" de la curva. Con una mayor reducción de la temperatura subcrítica, se aumenta tanto el inicio de la transformación como el tiempo para la transformación. Recuérdese que la austenita, una vez que se ha transformado completamente a una temperatura particular, no formará ninguna otra fase al ser enfriada a una temperatura menor. Si por ejemplo, deseamos formar *bainita* o *martensita* con el acero 1062, es obvio que la austenita debe enfriarse rápidamente hasta aproximadamente 270 °C en 0.75 s y permanecer a esta temperatura mediante aproximadamente 1 hora para asegurar la transformación completa.

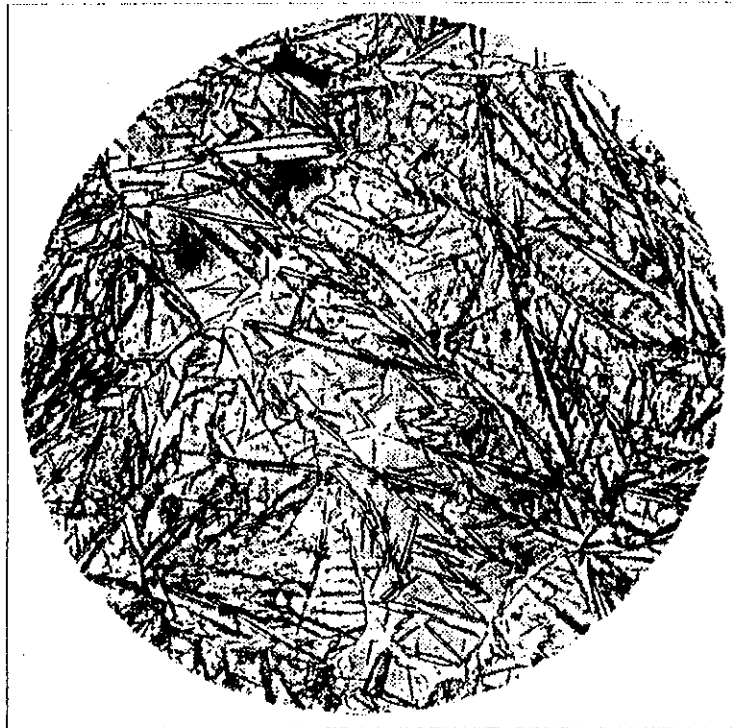
Si un material es muy delgado (por ejemplo, agujas de un rodamiento de agujas) y se tiene un medio para templado muy rápido tal como agua de hielo o salmuera helada, si será posible templar hasta 270 °C en 0.75 s. El templado rápido es necesario para evitar tocar la “rodilla” o pasar a 500 °C en la curva del diagrama. Si la curva de enfriamiento toca la “rodilla” se formará algo de perlita, esto no es deseable si se requiere solo formar bainita o martensita.

Si un componente grande va a endurecerse hasta el rango de la bainita-martensita, esto será difícil de lograr sin la formación de algo de perlita. Por lo tanto, los diagramas proporcionan al diseñador un gran campo para escoger los aceros que tengan la resistencia y tenacidad para satisfacer las necesidades del diseño. Si la transformación es violenta, es decir, si la velocidad de enfriamiento es muy rápida ocurre una reacción cuyo resultado es la formación de *Martensita*.

La martensita es una estructura dura y relativamente frágil. Su apariencia característica (forma de gran cantidad de agujas), se ilustra en la figura 11. Es importante notar que el cambio de austenita a martensita involucra un aumento de volumen.

Para un acero de composición química fija y tamaño conocido de grano de austenita (o sea, temperatura de la austenita), hay una velocidad de enfriamiento que transforma toda la austenita a martensita, ésta es la llamada *velocidad crítica de enfriamiento*. Si por alguna razón se suspende el enfriamiento durante la transformación, entonces no podrá continuar la transformación. La martensita es el agente que contribuye a la dureza del acero, entonces, resulta aparente que debe tenerse suficiente carbón para producir suficiente martensita. De allí que el límite hasta el cual un acero puede ser endurecido, dependerá sólo del contenido de carbón.

Figura 11. Microestructura de la martensita



Fuente: Aaron D. Deutschman. Página 44.

3.3 Fenómenos térmicos

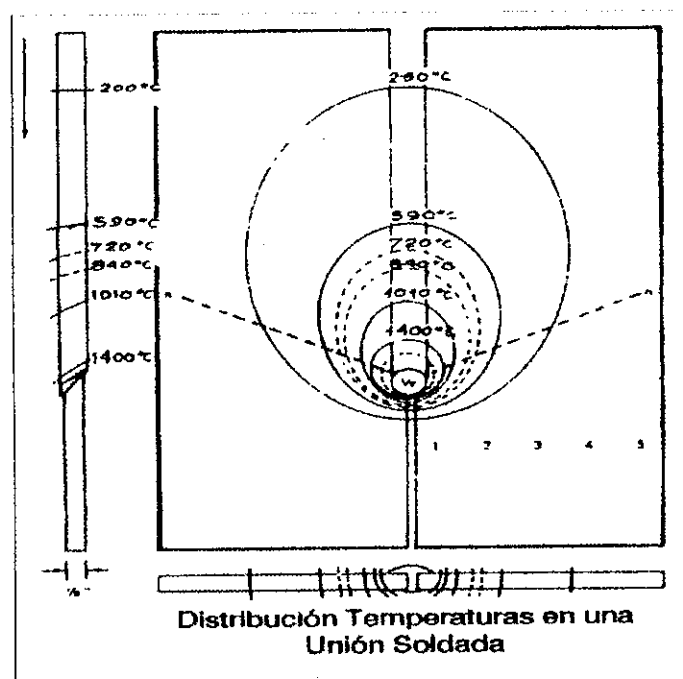
Con el conocimiento de algunas de las bases metalúrgicas tales como: composición química, propiedades mecánicas, diagramas de fase, podemos analizar los factores que determinan la metalurgia de una unión soldada de acero.

3.3.1 Características térmicas de la soldadura

Como la temperatura juega un papel tan importante, al determinar las características del acero, es preciso estudiar la razón por la cual se requiere conocer la distribución de temperaturas en una soldadura típica.

En la soldadura, el metal fundido se solidifica en cuestión de segundos. La cantidad de metal rara vez excede de una pulgada cúbica. La fuente de calor y el pocillo de metal fundido tienen una temperatura considerablemente más elevada que en los hornos de fusión. Por la rapidez con que se enfría la soldadura, las reacciones químicas que se inician no tienen tiempo suficiente para poder completarse. Al avanzar la formación del cordón, la temperatura del pocillo de soldadura desciende, debido a la abstracción del calor hacia el metal de base y a la radiación hacia la atmósfera del ambiente, y el metal se solidifica. En la figura se muestra la distribución de temperaturas en un instante dado, durante el proceso de soldadura.

Figura 12. Distribución de temperaturas en una unión soldada

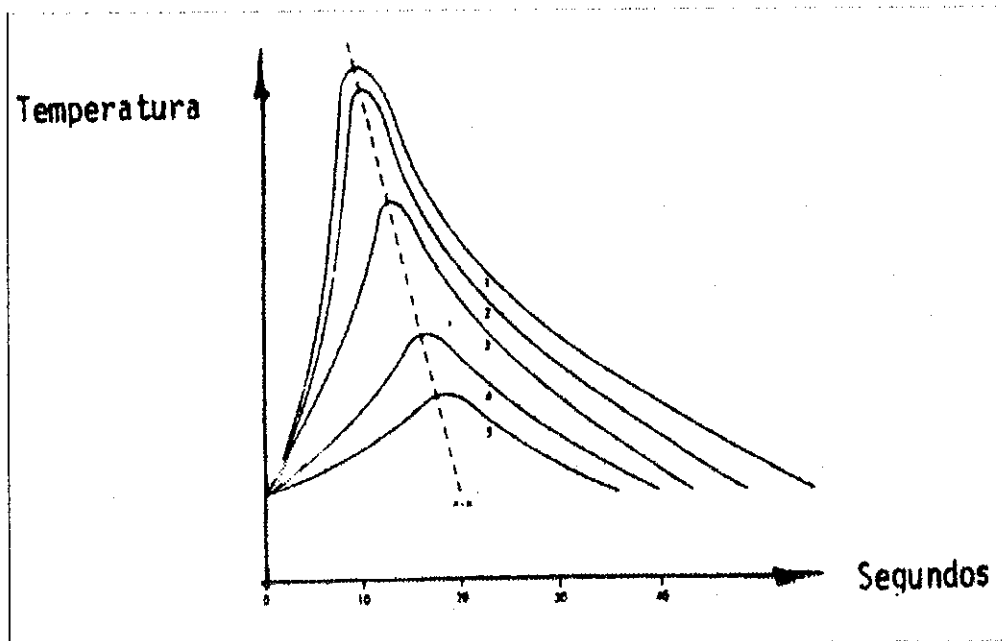


Fuente: Henry Horwitz. Soldadura y aplicaciones. Página 515.

Si se considera un acero al carbono de 0.4% de carbono, por ejemplo, es posible determinar que ciertas porciones del acero serán austenitizadas, por lo tanto estarán sujetas a endurecimiento al transformarse durante el enfriamiento.

Para la zona de la unión que fue austenizada, así como para la zona adyacente (zona térmicamente afectada), la velocidad de enfriamiento se vuelve muy importante. Las propiedades mecánicas del metal serán determinadas por los productos de transformación que a su vez, se verán determinados por la velocidad de enfriamiento.

Figura 13. Ciclos térmicos experimentados en una soldadura



Fuente: INDURA. Manual de Soldadura. Página 38.

La velocidad de enfriamiento mencionada depende de:

- ◆ Velocidad de entrada del calor.
- ◆ Masa y geometría del metal base.
- ◆ Precalentamiento.

En una soldadura es importante considerar estos factores y en particular, con relación a la zona afectada térmicamente (ZAT), ya que de ello dependen las propiedades finales de una unión soldada.

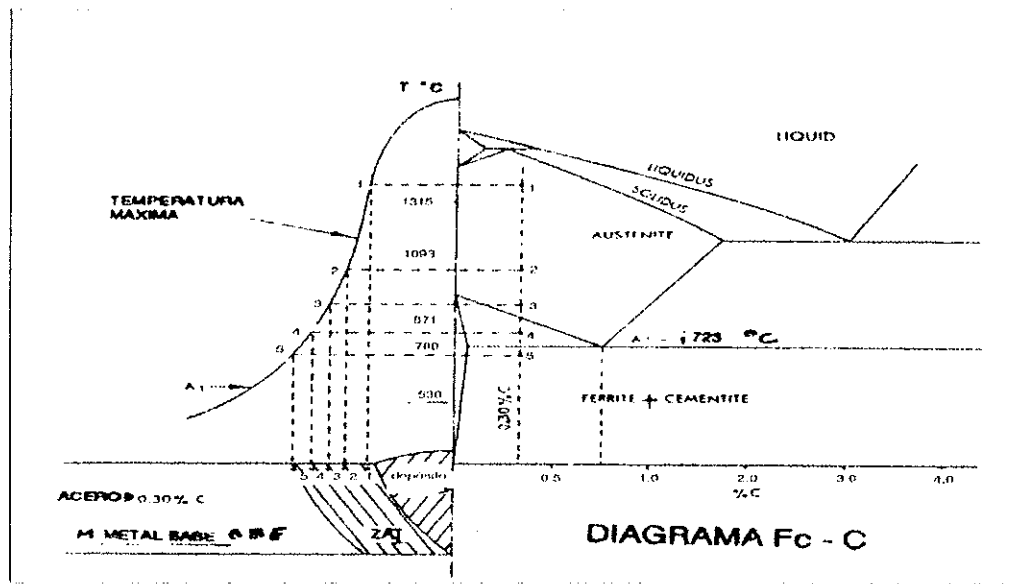
Los granos aparecen primero en la línea de fusión, en donde la temperatura es relativamente baja, y crecen con rapidez diferente, porque al aumentar de tamaño y al hacer presión los cristales unos contra otros, cada uno actúa de acuerdo al estado de su crecimiento. Sin embargo, los granos en crecimiento pueden empujar hacia fuera las inclusiones no metálicas, hasta la superficie de la soldadura. Esta es la razón por la que en la soldadura que se aplica hacia arriba, la escoria aparece primero sobre la superficie de la soldadura y no flotando hacia la raíz del cordón. Este es un estado en el que el material no metálico es forzado hacia fuera del metal líquido al comenzar a formarse los cristales y a hacer presión unos contra otros.

La solidificación uniforme del pocillo de metal se altera por refusión cuando se aplican pasadas subsecuentes. Esto puede resultar en bolsas de metal fundido en las que se retarda el crecimiento de los granos, produciendo regiones con probabilidades de contener inclusiones de escoria.

La figura 14 muestra algunas alteraciones que ocurren en la estructura de *la zona afectada por el calor* en un acero con bajo contenido de carbono. Adyacente a la soldadura se encuentra una zona de fusión incompleta (1) en la que el metal se calienta hasta una temperatura elevada y se forman granos gruesos. En el punto (2) disminuyen la temperatura y la magnitud del sobrecalentamiento, y por lo tanto, también el tamaño del grano. En el campo de normalización (3) el grano es fino, ya que el tiempo de calentamiento no es lo suficientemente largo para que se produzca entrecrecimiento entre los granos austeníticos, y el enfriamiento subsecuente expulsa los granos finos de perlita y ferrita. La zona de recristalización incompleta (4), es la zona en que los granos se descomponen en granos aún más finos. La zona de recristalización (5) se caracteriza

por la recuperación de los granos deformados por rodado. Las alteraciones estructurales que ocurren en el área afectada por el calor varían generalmente con el contenido de carbono y de elementos de aleación en un acero.

Figura 14. Diagrama de la zona afectada por el calor y su relación con el diagrama hierro-carbono



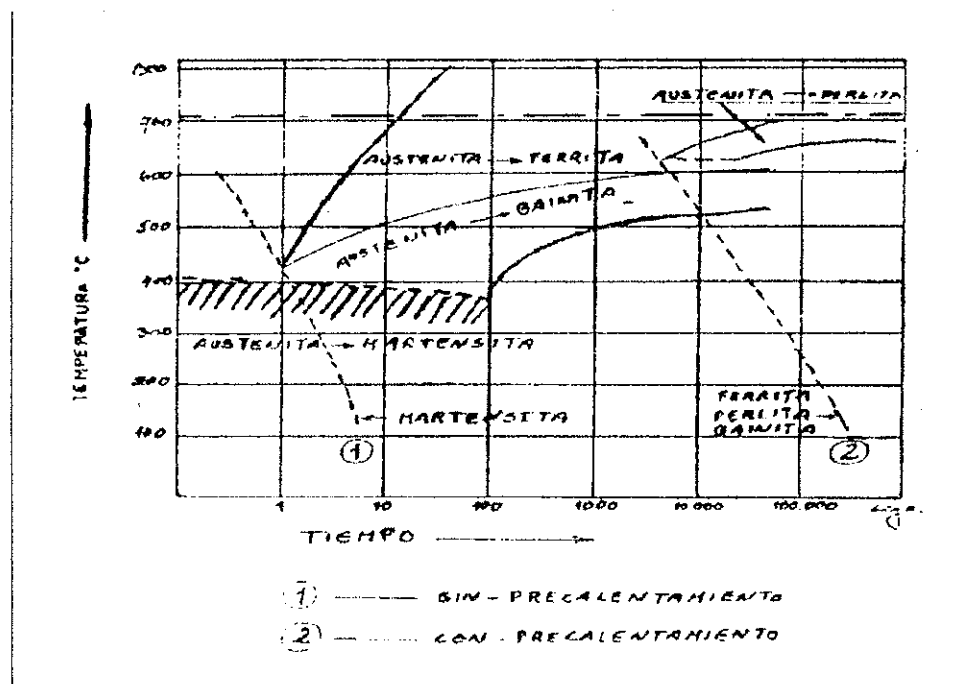
Fuente: INDURA. Manual de Soldadura. Página 39.

Si consideramos el diagrama de transformación isotérmica, que es aquel que mejor relaciona la realidad que acontece en el metal base, tenemos dos situaciones:

- a) Sin tratamiento térmico (sin precalentamiento): La curva de enfriamiento crítico es muy pronunciada, por lo tanto, el producto de la transformación será *martensita*. El depósito y la zona adyacente serán muy duros y frágiles. Debido a la baja ductibilidad, la expansión del 4% en volumen, y la restricción impuesta por la masa, hay una alta probabilidad de aparición de grieta.

b) Con tratamiento térmico (precalentamiento): En este caso, debido al mayor aporte de calor, la velocidad de enfriamiento de la unión y la zona adyacente será mucho menor. La curva sobre el diagrama T.T.T. muestra una microestructura completamente diferente a la anterior, tanto en la unión como en las zonas adyacentes.

Figura 15. Diagrama de transformación isotérmica (con y sin precalentamiento)



Fuente: INDURA. Manual de soldadura. Página 29.

3.3.2 Efecto del precalentamiento

El precalentamiento básicamente disminuye la velocidad de enfriamiento. Esto tiene varios efectos que pueden ser muy beneficiosos para la unión soldada. Entre los más importantes están la reducción de la porosidad y fisuras por hidrógeno, reducción del endurecimiento en la zona afectada térmicamente (ZAT), reducción de las pérdidas

térmicas y nivel de esfuerzos de la unión soldada. El empleo del precalentamiento está basado en tres consideraciones:

- a) Tipo de material (carbono equivalente).
- b) Espesores de material (tratamiento térmico sobre 10mm de espesor).
- c) Grado de restricción de la unión.

El concepto de carbono equivalente es muy importante debido a que relaciona los elementos presentes en el metal base con su grado de soldabilidad. Por otro lado nos permite saber cuando un material debe ser tratado térmicamente desde el punto de vista de su composición química.

$$C_{\text{equiv}} = \%C + \text{Mn}/20 + \text{Ni}/15 + (\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V})/10$$

Las condiciones que deben cumplirse para el empleo del precalentamiento, utilizando la ecuación anterior, son las siguientes:

- a) C_{equiv} es menor que 0.4 \longrightarrow sin tratamiento térmico
- b) C_{equiv} está entre 0.4 – 0.6 \longrightarrow con precalentamiento
- c) C_{equiv} es mayor que 0.6 \longrightarrow con pre y post calentamiento

La temperatura de precalentamiento se ve influida por tres factores importantes:

- 1) Contenido de carbono.
- 2) Contenido de aleación del metal de aporte.
- 3) Contenido de aleación del metal base.

Cuanto más alto sea el contenido de carbono, mayor será la temperatura requerida de precalentamiento; en un grado ligeramente menor, lo mismo puede decirse para el contenido total de los otros elementos. Todas las piezas que precisan precalentamiento deberán enfriarse lentamente.

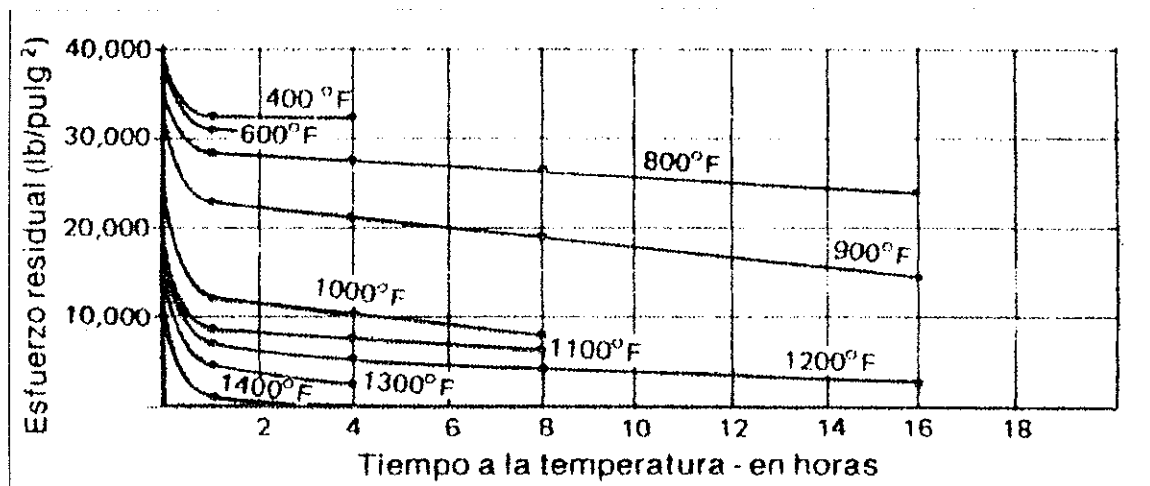
3.3.3 Efecto del postcalentamiento

Este proceso no es tan común como el precalentamiento, pero si se considera como un *alivio de tensiones*, se considera beneficioso. El punto más importante a recordar es que el tratamiento de postcalentamiento no sustituye al precalentamiento. Otro beneficio obtenido con el postcalentamiento es el aumento de la ductilidad, tenacidad de las zonas endurecidas adyacentes a las soldaduras (ZAT).

La American Welding Society define el tratamiento térmico de relevado o de alivio de esfuerzos como “el calentamiento uniforme de una estructura a una temperatura adecuada, inferior al intervalo crítico del metal de base, seguido por un enfriamiento uniforme”. El tratamiento térmico que se efectúa dentro del intervalo crítico es por lo general indeseable porque a menudo modifica la estructura del grano y su dimensión, ocasionando con ello daños a la pieza. Cuando se requiera *relevado de esfuerzos*, éste deberá hacerse calentando uniformemente hasta por lo menos 593 °C [1100 °F], o a temperaturas mayores, si puede hacerse el calentamiento sin que haya deformación. La estructura o las partes de la misma deberán elevarse lentamente hasta la temperatura especificada, y mantenerse a dicha temperatura durante un período proporcionado sobre la base de por lo menos una hora por pulgada de espesor, y se dejará enfriar lentamente en una atmósfera tranquila a una temperatura que no exceda de 315 °C [600 °F]. Aunque el tratamiento de relevado de esfuerzos se espera que sólo alivie o elimine los esfuerzos y no necesariamente que produzca cambio alguno en la microestructura del acero, los efectos generales de un tratamiento térmico de relevado de esfuerzos son los siguientes: relajamiento, revenido, recristalización, esferoidizado.

Al elevar la temperatura a 537.8 °C [1000 °F], o a valores mayores, se observa en la figura 16 que los esfuerzos residuales se alivian rápida y completamente. Las deformaciones creadas por el relevado de esfuerzos en una estructura soldada, son difíciles de calcular, pero generalmente son mucho más pequeños que las deformaciones creadas por el maquinado de partes no relevadas de esfuerzos, porque el maquinado efectuado después de la soldadura elimina el material sujeto a mayores esfuerzos.

Figura 16. Influencia de la temperatura y el tiempo en el relevado de esfuerzos



Fuente: Henry Horwitz. Soldadura y aplicaciones. Página 523.

3.4 Tratamiento térmico de los aceros

El tratamiento térmico es un término no muy exacto que comprende cualquier procedimiento térmico del acero para obtener propiedades específicas. Podemos definirlo como un calentamiento y enfriamiento de un metal para alterar sus propiedades mecánicas. Con el tratamiento térmico pudiéramos darle más resistencia y endurecimiento a un metal, relevando sus esfuerzos internos o sólo para endurecimiento de su superficie o el recocido de una pieza estirada en frío o para mejorar su maquinabilidad por esferoidización.

El conocimiento apropiado del diagrama hierro-carbono es muy útil para poder tratar térmicamente un acero, ya que dependiendo del porcentaje de carbono y la dureza que deseamos así va a ser el tiempo que el acero esté sometido a una temperatura determinada. Entre los tratamientos térmicos más comunes para los aceros y piezas sometidas a soldadura o recubrimientos de mantenimiento tenemos:

- ◆ Austenitización (normalizado): Es un proceso de ablandamiento en el cual el acero es calentado hasta aproximadamente $37.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ [$100\text{ }^{\circ}\text{F}$] arriba de la temperatura crítica superior y después se le deja enfriar en aire tranquilo hasta la temperatura ambiente. Con este procedimiento se pretende eliminar concentración de esfuerzos, producir granos de tamaño pequeño y refinamiento que permitan responder en forma adecuada a los siguientes tratamientos térmicos.
- ◆ Recocido: Es un tratamiento suavizador aplicado a los materiales para mejorar la mecanización o trabajo en frío. Este término también se usa para cubrir tratamientos en los que se intente eliminar esfuerzos, alterar propiedades físicas o mecánicas, producir una microestructura definida y eliminar gases.
- ◆ Templado: Los aceros de alto contenido de carbón son templables, pero debido a la distorsión, alabeo o agrietamiento que resulta de un enfriamiento rápido, su uso se limita sólo a casos especiales. Un buen medio para temprar permitirá inicialmente un enfriamiento muy rápido y después reduciendo la velocidad del enfriamiento a temperaturas bajas hará que se minimice la distorsión. Con el fin de disminuir el efecto de la distorsión y el agrietamiento son muy usados los siguientes medios para temprar: agua con una solución del 10% de sal, simplemente agua, sales líquidas, aceite soluble y agua, aceite, aire.
- ◆ Revenido: Después del templado, la martensita está tan dura y frágil que resulta ser de poco uso práctico. Para relevar los esfuerzos internos por consecuencia del templado, al acero se le da un tratamiento llamado revenido. Este tratamiento consiste en recalentar la pieza indirectamente hasta una temperatura inferior a la del límite de temperatura de transformación seguido por un enfriamiento lento.

3.5 Soldabilidad de los aceros

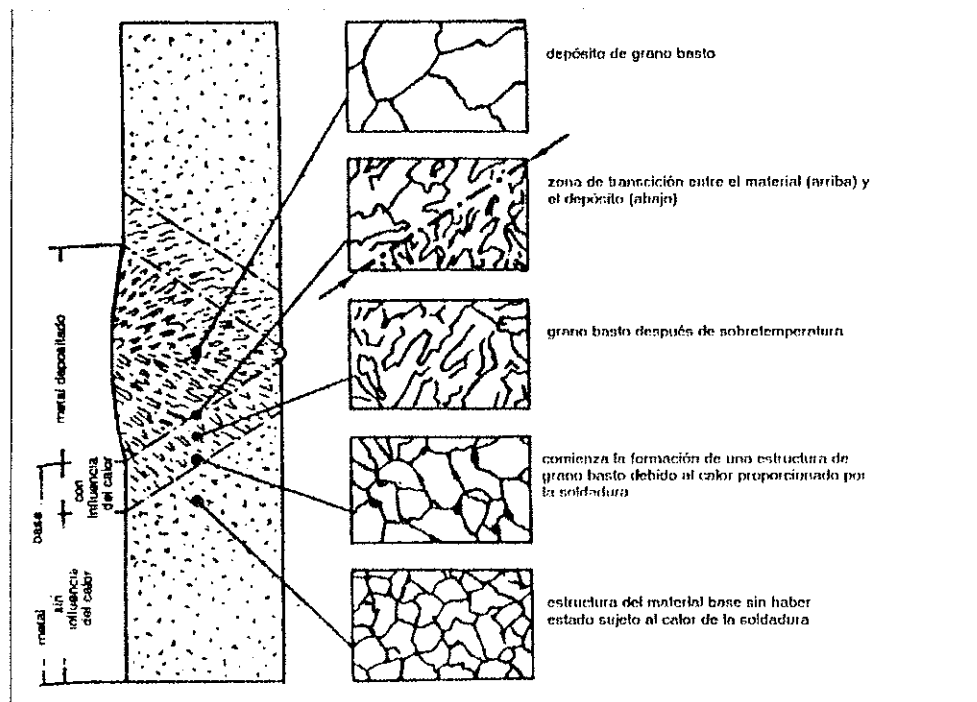
Para soldar estructuras exitosamente es necesario conocer una característica indispensable del material: su *soldabilidad*. Para determinar la soldabilidad de un acero, se debe conocer su constitución y tener en cuenta todos los factores que ejercen una influencia sobre la soldabilidad.

Los factores que determinan la soldabilidad de los aceros al carbono son:

- a) Métodos de fabricación: La cantidad y distribución de impurezas y de gases de un acero dependen del método de fundición, por lo tanto, la soldabilidad de un acero depende del método de fabricación del acero.
- b) Tendencia al endurecimiento: La tendencia al endurecimiento se determina por el contenido de carbono y la proporción de elementos de aleación en el acero.
- c) Impurezas: El grado de pureza de un acero se determina por su contenido de impurezas tales como: azufre, fósforo, nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, en porcentajes elevados.
- d) Tendencia a la rotura frágil: La tendencia de un acero a la rotura frágil aumenta con el contenido de impurezas que pueda tener dicho acero como las mencionadas anteriormente; así mismo el crecimiento del tamaño de grano de la estructura interna. Este grano puede encontrarse en el acero suministrado y/o puede generarse al soldar.
- e) Envejecimiento: Es el cambio en un material mediante el cual su estructura se recupera de una condición inestable producida por un templado o por un estirado en frío. El cambio en la estructura es debido a la precipitación de uno de los constituyentes de una solución sólida saturada, resultando con ello un material más resistente y duro, pero por lo general menos dúctil.
- f) Elementos de aleación: La influencia de los diferentes elementos de aleación varía según su naturaleza y su cantidad, y depende además de la presencia simultánea de

varios elementos de aleación. Todos estos factores intervienen en la soldabilidad de los aceros, en general son determinados casi sin excepción, por las impurezas (P, S, N, O, H) y por los elementos de aleación (C, Mn, Si, Al, Ti, Cr, Mo, Ni) del acero. Por consiguiente, la soldabilidad del acero se puede apreciar válidamente por la composición del material y estructura de éste.

Figura 17. Estructura de una soldadura sin tratamiento térmico posterior



Fuente: INDURA. Manual de Soldadura. Página 44.

3.6 Soldabilidad de algunos metales base

- a) Aceros al carbono bajo y medio (hasta 0.4% C): Pueden recubrirse por todos los procesos de soldadura con excelentes resultados. Generalmente no se precisa el precalentamiento ni el postcalentamiento, con la excepción de grandes masas de metal cuando haya que evitar grietas superficiales.

- b) Aceros con alto carbono (0.4% y más): Pueden recubrirse por todos los procesos de soldadura. Se aconseja el precalentamiento y el postcalentamiento. Es ventajoso el alivio de tensiones. Las piezas tratadas térmicamente que requieren alta dureza deberán ser sometidas a recocido antes de ser recargadas.
- c) Aceros de baja aleación: Pueden recubrirse por todos los procesos de soldadura. Se emplea el mismo procedimiento que para los aceros al carbono ordinario de contenido similar de carbono. Estos aceros tienen buena resistencia y dan una buena base para las capas de recubrimiento duro.
- d) Acero al manganeso (11-14%): Pueden ser recubiertos por todos los procesos de soldadura. Se debe mantener el material base lo más frío posible, evitar los cordones oxidados, depositar cordones cortos y alternados. El martillado es muy beneficioso con electrodos de acero al manganeso.
- e) Aceros inoxidables (cromo-níquel): Pueden recubrirse por todos los procesos de soldadura. El sistema oxiacetilénico produce depósitos no diluidos. Se debe emplear la llama con exceso de acetileno cuando la resistencia a la corrosión del metal base sea un factor importante.
- f) Níquel: Se prefieren los procesos de arco con gas inerte y de oxi-gas. El sobrecalentamiento debe evitarse ya que produce porosidad y la dilución del depósito soldado. Las aleaciones de recubrimiento duro no ferrosas se prefieren para aplicaciones referentes a la corrosión.
- g) Aceros para herramientas y troqueles: Pueden recubrirse por todos los procesos de soldadura. En la mayoría de los casos, las piezas tratadas térmicamente deberán ser sometidas a un recocido antes de recubrirlas. Es esencial un gran cuidado de las temperaturas de precalentamiento y post-calentamiento. Se precisa un enfriamiento controlado, pues el alivio de tensiones es muy beneficioso. A veces es muy recomendable el tratamiento térmico del metal después de haber aplicado la soldadura.
- h) Aceros inoxidables al cromo de la serie 400: Pueden recubrirse por todos los procesos de soldadura. Se precisa gran cuidado con el precalentamiento y la

temperatura de interpasos. Se debe tener especial cuidado en el método de enfriamiento para obtener depósitos libres de grietas.

3.7 Acero al manganeso

3.7.1 Descripción y propiedades

El acero al manganeso austenítico es una aleación no magnética. Debido a su alto contenido de manganeso y con un rápido enfriamiento, se obtienen altas resistencias a la tracción, al desgaste y buena ductilidad. Elaborado como acero fundido se obtiene una buena resistencia a la abrasión y al impacto fuerte.

La composición química de estos aceros es:

Carbono	1 – 1.4%
Manganeso	12 – 14%
Silicio	hasta el 2%

El contenido de silicio sirve para aumentar ligeramente el punto de fluencia, mientras que el níquel se considera como elemento de aleación para lograr mejor ductilidad. El acero al manganeso posee ciertas propiedades que son:

- a) Expansión térmica: al calentarse, el acero al manganeso austenítico se expande un 50% más que el acero al carbono.
- b) Conductividad térmica y eléctrica: tanto su conductividad térmica como eléctrica equivalen a la séptima parte de la correspondiente al acero al carbono.
- c) Su punto de fusión se encuentra a los 1340 °C.
- d) Magnetismo: el acero al manganeso austenítico no es magnético, aunque un fuerte trabajo en frío hará que la superficie se vuelva lentamente magnética.

- e) Resistencia a la abrasión: el acero al manganeso no es más resistente que el acero al carbono cuando ambas se someten a la prueba de abrasión causada por arena. Tampoco es tan resistente a la abrasión como un acero endurecido.
- f) Resistencia al impacto: cuando el desgaste involucra impacto, el acero al manganeso durará 10 veces más que el acero al carbono y mucho más que el acero al carbono endurecido y el acero aleado.

3.7.2 Efectos del calentamiento

El recalentamiento de un acero al manganeso es mucho más crítico que en un acero estructural corriente. Aunque el tratamiento de recocido hace más dúctiles a los aceros al carbono, a los aceros al manganeso austeníticos los hace perder ductilidad.

La causa de esta pérdida de ductilidad se debe a que la austenita con los átomos de carbono y manganeso que precipitan durante el calentamiento, primero como agujas de carbono en los granos de austenita y luego de un calentamiento prolongado como una red en los bordes de grano austeníticos, pueden aún formar una capa que encasille los átomos individuales de austenita.

La pérdida de ductilidad o fragilización depende también de factores como:

- ◆ Cantidad de carbono: Un acero al carbono de 1.4% forma carburos más rápidamente que un acero de 1.0% de carbono.
- ◆ Cantidad de manganeso: Una mayor cantidad de manganeso tiende a disminuir la precipitación de carburos.
- ◆ Efecto temperatura-tiempo: Si el recalentamiento origina un cambio en la estructura austenítica de estos aceros, se producirán zonas frágiles; el límite de calentamiento es de 300 °C. En aceros al manganeso de 1.2% C y 13% Mn, se producirá una transformación a un acero frágil después de 2 horas de estar expuestos a una

temperatura de 430 °C. Al exponerse a 370 °C se producirá un aumento de fragilidad después de 50 horas. Calentando sobre 300 °C, el acero manganeso pierde su ductilidad aproximadamente después de 800 horas.

- ◆ **Velocidad de enfriamiento:** Luego de calentar a temperaturas entre 400 y 700 °C, cierta cantidad de carbono migrará desde la austenita durante el calentamiento. El templado evita una posterior precipitación de carburos, mientras que un enfriamiento lento causa pérdidas adicionales de carbono en los bordes de grano.

3.7.3 Resistencia al desgaste

El acero de 12% de manganeso es, sin lugar a dudas, el mejor material para resistir al desgaste, sin embargo, tiene sus limitaciones. El acero al manganeso se comporta idealmente si las sollicitaciones son *impacto fuerte* junto con abrasión leve y fatigas a la tracción. Posee el acero características de endurecerse en trabajo, hasta durezas de 46 a 48 Rc. Existe un índice con relación a abrasión, éste es conocido como *factor de abrasión*. Este factor de abrasión es la razón que existe entre el peso perdido de la probeta y el peso perdido de una probeta standard. El factor de abrasión de un acero manganeso se encuentra entre 0.75 - 0.85.

3.7.4 Soldabilidad de los aceros al manganeso

Es recomendable que la soldadura al manganeso se efectúe por arco eléctrico. No es conveniente precalentar y la soldadura oxiacetilénica no debe emplearse debido al precalentamiento excesivo que produce. Deben considerarse 4 factores al realizar una soldadura al arco en acero al manganeso:

1. Se debe mantener la temperatura lo más baja posible. Para ello se deben emplear amperajes mínimos admisibles y electrodos de menor diámetro, así como mantener la zona adyacente a 1.2 cm [1/2"] de la soldadura bajo 300 °C.

2. Se debe mantener al mínimo la mezcla entre metal de aporte y metal base. Se deben emplear amperajes bajos. Al producirse una mezcla pronunciada entre el metal base y el metal de aporte, aumenta el contenido de carbono del último, lo que produce cordones frágiles.
3. Se deben depositar cordones lo suficientemente anchos.
4. Las tensiones que se crean en el metal base y el metal de aporte tienden a ser perjudiciales. Éstas se crean debido a su alto coeficiente de dilatación y baja conductividad térmica produciendo zonas de altas temperaturas. Estas tensiones pueden reducirse mediante un martillado neumático, haciendo que las tensiones de tracción se transformen en compresión.

3.8 Aceros inoxidable

En la actualidad existen más de 30 tipos de aceros inoxidable, así como un sin número de aleaciones especiales. La técnica de cómo soldar aceros inoxidable, así como los diferentes tipos de aporte a utilizar, requiere un conocimiento básico de la estructura y propiedades de los distintos metales bases.

Los aceros inoxidable se definen como aleaciones base hierro, que contienen relativamente poco carbono y un mínimo de 11% de cromo (algunos autores colocan un mínimo de 10% y otros de 12%), siendo este último elemento el responsable de la principal característica de esta clase de aceros, esto es, su resistencia química en medios corrosivos.

Para incrementar la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable, o para la utilización de éstos en aplicaciones específicas, se hace imperioso aumentar el contenido de cromo y/o agregar otros elementos como: níquel, molibdeno, niobio, etc. Los efectos que producen los elementos de aleación e impurezas en los aceros inoxidable se muestran en el siguiente cuadro.

Tabla X. Efectos de los elementos de aleación e impurezas en los aceros inoxidables

ELEMENTO	EFFECTOS
Carbono	<ul style="list-style-type: none"> - Promueve fuertemente la formación de austenita. - Imparte resistencia y la mejora a elevadas temperaturas. - Contrariamente, afecta a la corrosión en el metal depositado y reduce la tenacidad a bajas temperaturas.
Columbio (Niobio)	<ul style="list-style-type: none"> - Fuerte formador de carburos. Se utiliza para estabilizar aceros inoxidables austeníticos, evita así la precipitación de carburos de cromo en el rango de 420 - 870 °C. Por tanto, inhibe la corrosión intergranular.
Cromo	<ul style="list-style-type: none"> - Promueve la formación de austenita. - Incrementa la resistencia a la corrosión y oxidación.
Cobre	<ul style="list-style-type: none"> - Usado para mejorar la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables en presencia de algunos líquidos, los cuales pueden ser reductores u oxidantes.
Molibdeno	<ul style="list-style-type: none"> - Formador de ferrita y carburos. - Usado para mejorar la resistencia a elevadas temperaturas y al creep. - Mejora la resistencia a la corrosión de los aceros en medios no oxidante y la resistencia al pitting en cualquier medio.
Manganeso	<ul style="list-style-type: none"> - Formador de austenita. - Mejora la resistencia al agrietamiento en caliente en el depósito de soldadura, en aleaciones completamente austeníticas.
Nitrógeno	<ul style="list-style-type: none"> - Fuerte formador de austenita. - Usado para minimizar el crecimiento de grano a elevadas temperaturas de aceros alto en cromo. - Contrariamente, afecta la tenacidad del metal depositado a temperaturas criogénicas. - Aumenta la resistencia.
Níquel	<ul style="list-style-type: none"> - Formador de austenita. - Usado para mejorar la resistencia a la corrosión frente a líquidos no oxidantes. - Mejora la tenacidad a bajas temperaturas.
Fósforo Azufre Selenio	<ul style="list-style-type: none"> - Ocasionalmente, uno de estos tres elementos es agregado a los aceros inoxidables junto con una pequeña cantidad de molibdeno o zirconio para mejorar la maquinabilidad del acero. - Estos tres elementos promueven el agrietamiento en caliente del depósito de soldadura.

3.8.1 Clasificación de los aceros inoxidable

Como se sabe existe una gran multiplicidad de aceros inoxidable, que varían en un amplio rango de composición química. Esto hace necesario una clasificación o división de éstos.

3.8.1.1 Según la serie AISI

Hay miles de posibles combinaciones para hacer aceros aleados y aceros inoxidable; en orden a organizarlos, se han desarrollado varios sistemas. La AISI (American Iron and Steel Institute) ha desarrollado un sistema de clasificación que es reconocido a nivel mundial. Se basa en cinco números dígitos para los aceros inoxidable, denominándose habitualmente *series*.

Los primeros tres dígitos designan la clasificación de acuerdo a su composición química y los dos últimos, separados por un guión, indican el tipo de revestimiento y características de empleo. En los casos en que aparezca la letra "L", indica bajo contenido de carbono en el depósito. En este caso, la norma AWS exige un máximo de 0.04% de carbono, industrialmente se utiliza un máximo de 0.03%.

SERIE AISI	ELEMENTOS	CARACTERÍSTICAS
200	Cr – Ni – Mn	No templables (austeníticos)
300	Cr – Ni	No templables (austeníticos)
400	Cr	(1) templable (martensítico) (2) no templable (ferrítico)
500	Cr (4 – 6) %	Templables al aire (martensítico)

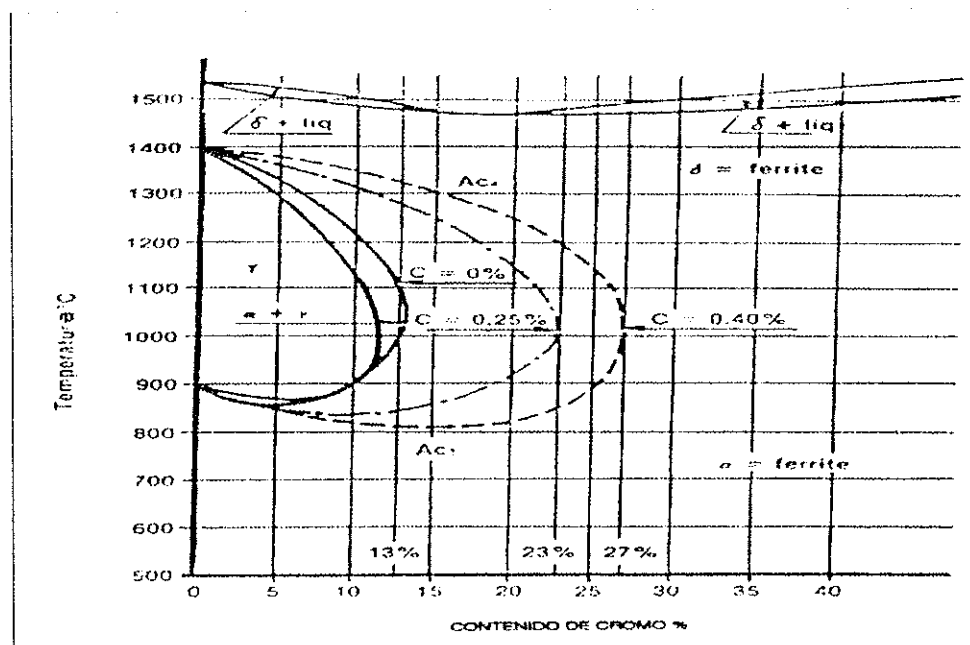
3.8.1.2 Según la estructura formada por sus átomos

Existen tres tipos básicos de aceros inoxidable: martensíticos, ferríticos y austeníticos, cuyos nombres se derivan de la estructura o fase predominante que presentan a temperatura ambiente.

3.8.1.2.1 Aceros inoxidables martensíticos

Estos son la mayoría de los aceros inoxidables de la serie 400, y todos los de la serie 500. Son sólo endurecibles por tratamientos térmicos; para poder ser endurecibles por tratamiento térmico deben cambiar de ferrita a austenita y luego a martensita. Para producir la característica de inoxidable en un acero, éste debe contener un mínimo de 11.5% de cromo y un porcentaje de 0.1% de carbono.

Figura 18. Relación entre el contenido de carbono y cromo en un acero inoxidable



Fuente: INDURA. Manual de Soldadura. Página 79.

En la medida que aumente el porcentaje de cromo también debe elevarse el porcentaje de carbono, esto es para que la ferrita pueda transformarse en martensita. La principal ventaja de estos aceros inoxidable son su excelente resistencia, dureza y resistencia a la abrasión. Los aceros inoxidable martensíticos son magnéticos. La mayor desventaja es que son autotemplables, es decir, endurecen por enfriamiento rápido con lo cual aumenta la tendencia a la fisuración; para evitar este fenómeno es preciso someter el metal a un tratamiento térmico apropiado.

3.8.1.2.2 Aceros inoxidable ferríticos

Una parte de los aceros inoxidable serie 400 se consideran dentro de este grupo. La razón carbono – cromo es tal que no hay suficiente carbono para poder endurecerlos por tratamiento térmico.

Los aceros inoxidable ferríticos son magnéticos y más resistentes a la corrosión, que los aceros martensíticos. Estos aceros inoxidable poseen como desventaja que al mantenerlos a temperaturas entre 850 a 900 °C, el tamaño de grano tiende a aumentar, dando como resultado un aumento de la fragilidad. El crecimiento de grano en estas aleaciones no puede remediarse por tratamientos térmicos y no es posible remover la fragilidad que existe debido a esta causa. Los aceros inoxidable ferríticos sí pueden enfriarse a partir de los 560 °C a la temperatura ambiente, en aire, o por enfriamiento rápido en agua.

Siendo dúctil este acero, puede fácilmente estirarse, acuñarse o doblarse. Si se trabaja en frío, se incrementa en un 30% su resistencia a la tracción con un pequeño incremento en la resistencia última. Para poder maquinar este tipo de acero inoxidable se requiere que las herramientas de corte estén siempre bien afiladas.

3.8.1.2.3 - Aceros inoxidable austeníticos

Los aceros inoxidable de las series 300 y 200 abarcan este grupo, siendo éstos los de mayor soldabilidad. La razón de la tendencia es muy simple y se explica sobre la base de que los aceros austeníticos presentan mejor soldabilidad que los aceros ferríticos y martensíticos, además se caracterizan por su buena resistencia a la corrosión y excelente resistencia a altas y bajas temperaturas.

Los aceros inoxidable austeníticos son completamente *no-magnéticos*. Estos aceros no se endurecen por tratamientos térmicos, pero sí son endurecidos por trabajo en frío. Esta situación se debe a la adición de níquel, que es un elemento austenizador, lo cual favorece la estructura austenítica.

La estructura austenítica de estos aceros posee gran elasticidad, permitiendo así uniones de excelente calidad. Las propiedades físicas de estos aceros difieren sensiblemente de la de los aceros al carbono, siendo su punto de fusión más bajo. Estos también presentan mayor resistencia al flujo de electrones, por lo tanto, su resistividad eléctrica es más alta.

La conductividad térmica de estos aceros es mucho menor que la de los aceros al carbono, por lo tanto el calor tiende a transmitirse más lentamente y se localiza en las proximidades de las uniones de soldadura. El coeficiente de dilatación térmica es aproximadamente un 50% mayor que el del acero al carbono, por consiguiente pueden producirse deformaciones y tensiones residuales mucho mayores que en el acero al carbono.

3.8.2 Efecto de la precipitación de carburos o sensibilización

Durante el proceso de soldadura se establece un gradiente de temperatura entre la zona fundida y el material base, el cual va desde la temperatura de fusión a la temperatura ambiente. Así pues, en las proximidades de la zona fundida encontramos una zona con temperaturas comprendidas entre 425 y 815 °C. Esta zona es perjudicial para estos aceros ya que el carbono tiende a combinarse con el cromo, formando *carburos de cromo*, que precipitan en las uniones de granos de la matriz de metal. Este fenómeno de precipitación de los carburos, produce un empobrecimiento en cromo de las uniones de los granos, de tal forma, que el contenido en cromo puede descender localmente, por debajo del límite necesario para asegurar una buena resistencia a la corrosión.

La pérdida de cromo por precipitación es tanto más elevada cuanto más tiempo se mantenga la zona afectada en el rango de temperaturas de sensibilización (425-815 °C), y cuanto mayor sea el contenido en carbono. El metal base inmediatamente adyacente a la soldadura es recocido por el calor del arco de soldadura y generalmente, también se enfría de modo muy rápido, lo bastante para retener en solución los carburos. Así, esta zona exhibe usualmente una resistencia normal al ataque por corrosión. A una distancia más bien pequeña, tal vez 6 mm. (depende del ciclo térmico), hay una zona estrecha en la cual el aporte térmico es bajo y la velocidad de enfriamiento lenta. En esta zona afectada por el calor la precipitación intergranular de los carburos de cromo tiene más probabilidad de producirse. La precipitación de carburos puede ser altamente dañina, encontrándose solamente tres métodos que permiten evitar dicha precipitación:

- 1) Tratamiento térmico de solubilización.
- 2) Empleando una calidad de acero con un contenido de carbono de 0.03% máximo.
- 3) Utilizando elementos estabilizadores que preferentemente formen carburos como el titanio, tántalo, niobio.

3.8.2.1 Tratamiento térmico de solubilización

El tratamiento térmico de solubilización es un método positivo para retener los carburos en solución y así restaurar la resistencia normal a la corrosión, pero generalmente presentan un inconveniente y es que rara vez es factible dicho tratamiento, debido a dos razones:

- Temperatura de tratamiento térmico de 1023 a 1121 °C.
- Velocidad de enfriamiento muy rápida.

3.8.2.2 Aceros inoxidables con contenido extra – bajo de carbono

Los aceros inoxidables del tipo 304L y 316L están inmunizados a la precipitación de carburos dentro del intervalo de los 425 a 815 °C, sin disminuir su resistencia a la corrosión. Sin embargo, los carburos pueden precipitarse cuando estos aceros son calentados y mantenidos en el intervalo de la temperatura de sensibilización durante un período prolongado, como es el de servicio. Generalmente, estos aceros se recomiendan para uso a temperaturas inferiores a 425 °C.

3.8.2.3 Aceros inoxidables estabilizados

Comparativamente con los aceros extra - bajos en carbono, estos aceros estabilizados exhiben una alta resistencia a elevadas temperaturas. Para trabajar en ambientes *corrosivos* y en el intervalo de *sensibilización* es necesario un acero inoxidable estabilizado con columbio o titanio.

3.8.3 Tipos de corrosión

Antes de considerar los aspectos referentes a la soldadura, es conveniente examinar las posibles formas y causas de corrosión que pueden presentarse en los aceros inoxidable. A la hora de elegir un aporte de acero inoxidable, deberá tenerse en cuenta la naturaleza, composición y variaciones desarrolladas con el tiempo de los agentes corrosivos a los que se someterá el acero; de igual manera la temperatura y presión de dichos agentes corrosivos así como los esfuerzos que deberá soportar la pieza o estructura.

La resistencia a la corrosión de los aceros se produce cuando existe un ataque químico o electroquímico de una o más sustancias que le rodean. La resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable se debe a la formación, en la superficie de los mismos, de una película de óxido de cromo muy delgada y resistente, que recibe el nombre de película pasiva. Esta película se forma siempre que el medio que rodea el acero sea capaz de ceder oxígeno.

3.8.3.1 Corrosión intercrystalina

Este tipo de corrosión se produce cuando el acero es mantenido durante cierto tiempo a temperaturas comprendidas entre 450 y 900 °C, en este rango se produce una precipitación de carburos de cromo en los límites de grano, empobreciendo de cromo las zonas contiguas a los mismos, produciendo así el ataque corrosivo. Cuando el contenido de carbono es superior al 0.03%, después de un tratamiento térmico entre 500 y 700 °C, un contenido bajo de cromo, así como un medio agresivo altamente oxidante, son condiciones que producirán en una unión soldada dicha corrosión intercrystalina.

3.8.3.2 Corrosión en forma de lámina de cuchillo

Este tipo de corrosión se produce, principalmente, en los aceros estabilizados con titanio, tales como: AISI 321 y AISI 318. Debido a la alta temperatura durante la soldadura, el titanio se vaporiza en la zona inmediata a la unión soldada y desaparece junto con la escoria. El carbono queda liberado y, en vez de combinarse con el titanio para formar el carburo de titanio, se combina con el cromo, formando carburos de cromo, que se precipitarán en los límites de grano.

Los carburos de cromo son muy ricos en cromo; elemento que es absorbido hacia esta zona originándose una zona de bajo contenido de cromo. Esto produce una diferencia de potencial en un medio conductor, y como consecuencia, queda sensible a la corrosión en un medio agresivo. Dado que esto ocurre en la zona inmediata a la unión soldada y sigue la línea de dicha unión, esta forma de corrosión intercrystalina se denomina *ataque en forma de cuchillo*.

3.8.3.3 Corrosión bajo tensiones

Esta forma de corrosión aparece bajo condiciones tales como: tensiones, medios halogenados (cloruros, fluoruros, etc.), temperatura de unos 70 °C, materiales que son sensibles a este tipo de corrosión. La corrosión bajo tensiones origina grietas transcrystalinas que no pueden ser reparadas. El único método posible de reparación es retirar las piezas dañadas y reemplazarlas por otras nuevas.

3.8.3.4 Picaduras

La picadura es la forma más normal de corrosión en piezas que contengan productos químicos. Así, la corrosión por picadura (pitting) ocurre transgranularmente (a través

del grano) cuando la película protectora de óxido de cromo es destruida en pequeñas zonas.

Una vez comenzado el ataque, éste puede acelerarse por la diferencia que existe, en potencial eléctrico, entre el área protegida (cátodo) versus la pequeña área activa (ánodo), dando origen a la creación de pares galvánicos. Este tipo de corrosión tiende a presentarse cuando:

- El material es sensible (bajo en molibdeno).
- Interferencias superficiales (presencia de metales extraños o defectos en la superficie).
- Deficiente decapado y/o pasivado después de la soldadura.
- Presencia de derivados halogenados (especialmente cloruros y fluoruros).

Como material de aporte es necesario elegir un electrodo de más alta aleación con el fin de compensar la dilución del acero.

3.8.3.5 Corrosión en grietas

Este tipo de corrosión se produce, como su nombre lo indica, en las grietas que se produzcan en la fase de construcción. La corrosión en grietas puede evitarse seleccionando el tipo de acero inoxidable con la debida resistencia.

En los materiales que son sensibles a la corrosión en grietas, éstas se originarán en aquellas cavidades en las que hay carencia de oxígeno, ya que estas áreas con bajo contenido de oxígeno se comportan como un cátodo y en presencia del medio conductor y corrosivo, se produce la corrosión por picaduras en las grietas. Tanto la corrosión en grietas como las picaduras dan lugar al mismo resultado: un agujero.

3.8.4 Microfisuración en uniones soldadas

Las grietas intergranulares son el resultado de la formación de microfisuras en el metal depositado o en el metal base cercano a la soldadura. El fenómeno de la fisuración en aceros inoxidable está relacionado con:

- a) Microestructura del metal depositado, especialmente el contenido de ciertos residuos o trazas de elementos.
- b) Composición del metal depositado, especialmente el contenido de ciertos residuos o trazas de elementos.
- c) Tensiones desarrolladas en la soldadura mientras se enfría.
- d) Ductilidad del metal depositado a altas temperaturas.
- e) Presencia de entalladuras.

La susceptibilidad a la microfisuración depende mucho del primero de los efectos enumerados, la microestructura del metal depositado. La estructura austenítica de materiales depositados se considera más susceptible a la microfisuración, siendo atenuada cuando la estructura es dúplex, es decir, formada por *ferrita delta* y *austenita*.

3.8.4.1 Prevención de la microfisuración

La prevención de micro-grietas puede abordarse de dos formas diferentes, pero dependiendo cualquiera de ellas de la microestructura del metal depositado, es decir, de una estructura dúplex o de una estructura totalmente austenítica.

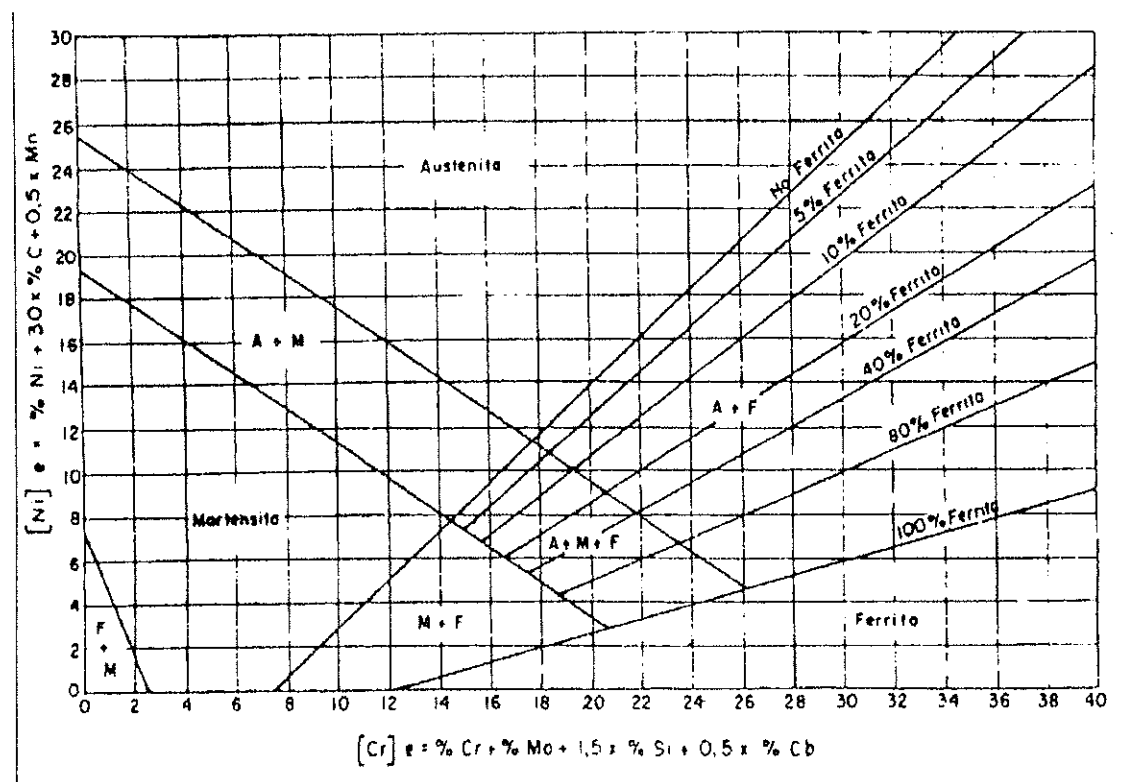
Para obtener una estructura dúplex en el metal depositado hay que controlar el contenido de *ferrita delta* (aproximadamente de un 3 a un 5%), seleccionando para ello el metal de aporte adecuado.

3.8.4.2 Diagrama de Schaeffler

Este diagrama *Schaeffler* se utiliza a fin de determinar la cantidad de ferrita delta que se obtiene en el metal depositado, cuya composición química es conocida.

Actualmente, la medida del contenido de ferrita delta se puede determinar convenientemente con ayuda de un aparato del tipo analizador magnético. La microfisuración puede ser prevenida o minimizada mediante el control de la ferrita delta en el metal depositado, aún cuando, sustancialmente, ha de ser considerada la dilución del metal de aporte y del metal base para evaluar el contenido de ferrita delta en la soldadura.

Figura 19. Diagrama de Schaeffler



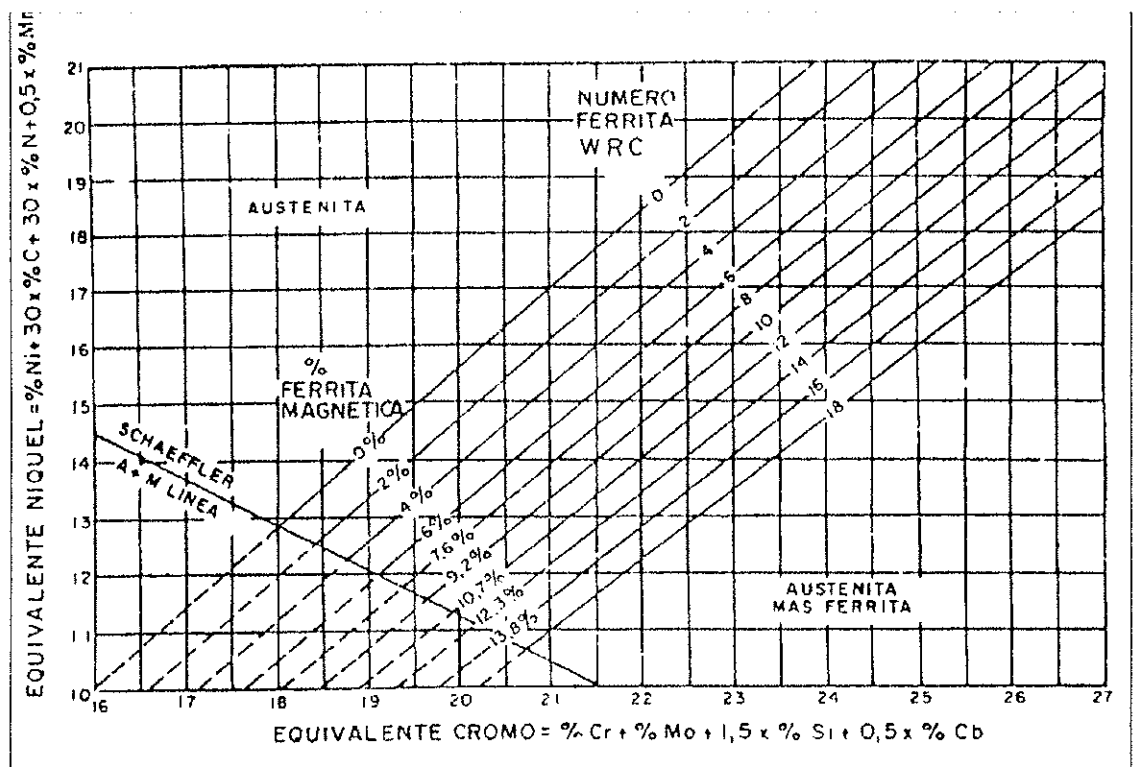
Fuente: INDURA. Manual de Soldadura. Página 86.

3.8.4.3 Diagrama de Delong

Considerando que muchas coladas de los aceros inoxidable austeníticos contienen apreciables cantidades de nitrógeno, elemento gammágeno, el diagrama de constitución se ha revisado e incrementado en el factor correspondiente al nitrógeno.

Este diagrama está modificado en forma y en la inclinación de las líneas para mejorar la exactitud de la ferrita estimada. Aún con los procedimientos de soldadura más idóneos y con la composición química óptima, los materiales depositados completamente austeníticos son más sensibles en la fisuración que los de estructura dúplex (ferrita + austenita). Si se desconoce el porcentaje de nitrógeno se debe asumir un valor de 0.06%.

Figura 20. Diagrama de Delong

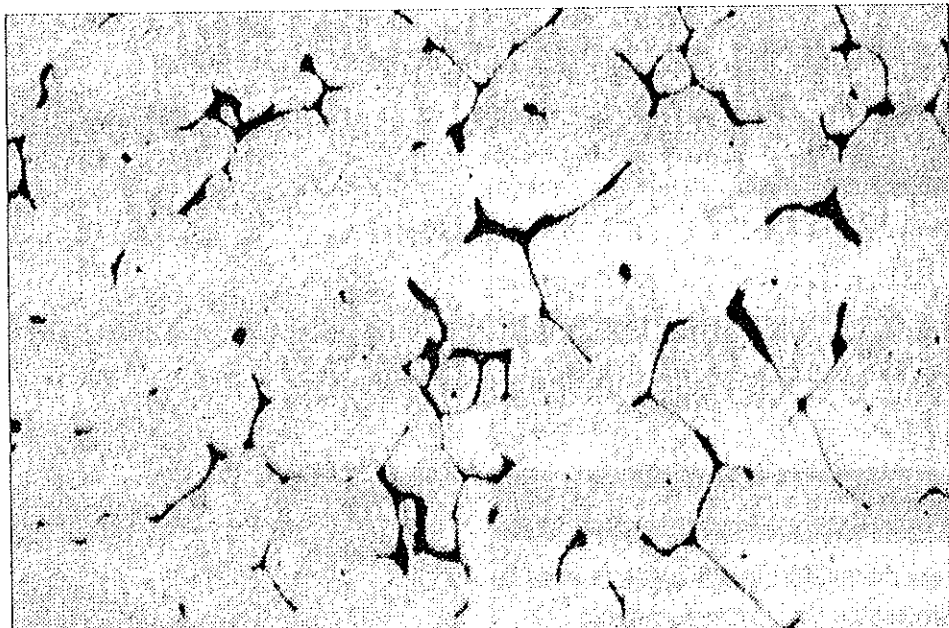


Fuente: INDURA. Manual de Soldadura. Página 87.

Una cierta cantidad de ferrita en el depósito tiene una influencia favorable, en cuanto a que reduce la tendencia al agrietamiento o fisuración en caliente del metal depositado e incrementa la resistencia de la unión. Sin embargo, el contenido de ferrita puede causar un detrimento en la resistencia a la corrosión frente a la presencia de algunos ambientes especiales, por ejemplo ácidos oxidantes a temperatura.

Por otra parte, se observa una disminución de la tenacidad en servicios criogénicos y en servicios expuestos a elevadas temperaturas, esto último debido a la aparición de una fase frágil llamada sigma. En la siguiente figura se aprecia una microfotografía del metal depositado con el electrodo 316L, en donde se observa un contenido de 6.8 NF (número de ferrita), mostrándose una matriz austenítica con presencia de ferrita de color oscuro lo cual asegura el buen comportamiento de éste en la mayoría de las aplicaciones industriales, donde es recomendado.

Figura 21. Microestructura del metal depositado 316L



Fuente: INDURA. Informativo mensual número 30. Página 7.

3.8.5 Tratamientos térmicos

3.8.5.1 Pre calentamiento

En general, no es recomendable ni beneficioso un pre calentamiento en la soldadura de los aceros inoxidables austeníficos. En algunos casos, se puede incrementar la precipitación de carburos o causar deformaciones en las piezas con este tratamiento.

3.8.5.2 Post – tratamiento de alivio de tensiones

Aunque los efectos de las tensiones residuales sobre las propiedades de los aceros inoxidables son limitados en comparación con los aceros trabajados en frío, dichas tensiones pueden afectar significativamente al comportamiento mecánico de una estructura.

La falta de uniformidad en el calentamiento, produce tensiones localizadas que pueden contribuir a distorsiones y deformaciones del material. El alivio de tensiones puede llevarse a cabo sobre un amplio intervalo de temperaturas. Aproximadamente, un tiempo de 1 hora por pulgada de espesor a una temperatura de 650 °C, ó 4 horas por pulgada de espesor a unos 650 °C son magnitudes que se vienen estimando como óptimas.

Debido al elevado coeficiente de expansión y a la baja conductividad térmica de los aceros inoxidables, el enfriamiento debe ser lento desde la temperatura de alivio de tensiones. La selección de la temperatura de alivio de tensiones debe ser compatible con la existencia aceptable de precipitación de carburos y con la deseable resistencia a la corrosión.

3.8.6 Procedimiento para soldar aceros inoxidables

Para soldar adecuadamente los aceros inoxidables y así mismo poder seleccionar el material de aporte adecuado, se requiere la consideración de los constituyentes estructurales del metal depositado.

Últimamente, estos constituyentes estructurales determinan las propiedades mecánicas, la sensibilización a la fisuración y la resistencia a la corrosión del metal depositado. Los constituyentes de principal interés son la austenita, la ferrita y los carburos. Para poder soldar aceros inoxidables se recomienda un arco corto y corriente ligeramente superior cuando se suelda con CA, que cuando se usa CC con polaridad invertida.

Debido a que el acero inoxidable se dilata un 50% más que los aceros al carbono y siendo su disipación del calor por conducción 50% más lenta, tiende a pandearse y torcerse al ser soldado. Para evitar esto, se debe emplear la corriente más baja posible o soldar con el máximo de velocidad. El uso de un respaldo de cobre ayuda enormemente a disipar el calor evitando así las distorsiones, disminuyendo además la segregación de carbono. Para soldar con electrodos de acero inoxidable se requiere corrientes más bajas que en acero dulce, debido a que la resistencia del núcleo es de 6 a 9 veces mayor y la temperatura de fusión 100 °C menor.

3.8.7 Composición química de los aceros

La sociedad de ingenieros automotores SAE, y el instituto americano del hierro y el acero AISI, han efectuado clasificaciones extensas de los aceros de acuerdo a su composición química, llegando a establecer la siguiente normalización:

Designación en letras:

- B: Acero al carbono (Horno Bessemer, ácido)
- C: Acero al carbono (Horno solera abierta, básico)
- E: Acero al carbono (Horno eléctrico)

Designación numérica:

- (10XX) Aceros al carbono
- (1300) Manganeso 1.6 a 1.9%
- (23XX) Níquel 3.5%
- (25XX) Níquel 5.0%
- (31XX) Níquel 1.25% - Cromo 0.6%
- (33XX) Níquel 3.50% - Cromo 1.6%
- (40XX) Molibdeno
- (41XX) Cromo – Molibdeno
- (43XX) Níquel – Cromo – Molibdeno
- (46XX) Níquel 1.65% - Molibdeno 0.25%
- (48XX) Níquel 3.25% - Molibdeno 0.25%
- (51XX) Cromo
- (52XX) Cromo y alto carbono
- (61XX) Cromo – Vanadio
- (86XX) Cromo – Níquel – Molibdeno
- (87XX) Cromo – Níquel – Molibdeno
- (92XX) Silicio 2.0% - Cromo
- (93XX) Níquel 3.0% - Cromo – Molibdeno
- (94XX) Níquel 0.45% – Cromo 0.40% – Molibdeno 0.12%
- (97XX) Níquel 0.55% – Cromo 0.17 – Molibdeno 0.20%
- (98XX) Níquel 1.00% – Cromo 0.80% – Molibdeno 0.25%

3.8.8 Temperaturas de precalentamiento para diferentes aceros

Las temperaturas indicadas en esta tabla representan los valores mínimos para cada material, por lo que se recomienda usar siempre la temperatura más alta de las cifras indicadas para el metal base y para el material de aporte.

Tabla XI. Temperaturas de precalentamiento (1ª parte)

Aceros	Designación	% Carbono	Precalentamiento recomendado
ACEROS AL CARBONO	Aceros al carbono	Bajo 0.2	Sobre 90 °C
	Aceros al carbono	0.20 – 0.30	90 °C – 150 °C
	Aceros al carbono	0.30 – 0.45	150 °C – 260 °C
	Aceros al carbono	0.45 – 0.80	260 °C – 420 °C
ACEROS AL CARBONO – MOLIBDENO	Aceros al carbono – molibdeno	0.10 – 0.20	150 °C – 260 °C
	Aceros al carbono – molibdeno	0.20 – 0.30	200 °C – 320 °C
	Aceros al carbono – molibdeno	0.30 – 0.35	260 °C – 420 °C
ACEROS AL MANGANESO	Aceros al manganeso medio	0.20 – 0.25	150 °C – 260 °C
	SAE T 1330	0.30	200 °C – 320 °C
	SAE T 1340	0.40	260 °C – 420 °C
	SAE T 1350	0.50	320 °C – 480 °C
	Aceero al manganeso 12%	1.25	No requiere
ACEROS DE ALTA RESISTENCIA	Aceero molibdeno – manganeso	0.20	150 °C – 260 °C
	Aceero T1	0.10 – 0.20	90 °C – 200 °C
	Aceero alta resistencia ARMCO	0.12 max.	Sobre 90 °C
	Aceros Mayari R	0.12 max.	Sobre 150 °C
	Aceros DUR – CAP	0.25 max.	90 °C – 200 °C
	Aceros Yoloy	0.05 – 0.35	90 °C – 320 °C
	Aceros CU – Cr – Ni	0.12 max.	90 °C – 200 °C
	Aceros cromo – manganeso	0.4	200 °C – 320 °C
Aceros Hi	0.12 max.	90 °C – 260 °C	

Fuente: INDURA. Manual de Soldadura. Página 97.

El precalentamiento de las piezas a reparar con soldadura resistente al desgaste puede ser necesario, para evitar grietas en el metal base, como también en el depósito. La temperatura de precalentamiento para cada aleación está indicada en su descripción respectiva y dependerá del contenido de carbono y elementos de aleación en el metal base. Cuanto más alto sea el contenido de carbono, mayor debe ser la temperatura de precalentamiento.

Tabla XII. Temperaturas de precalentamiento (2ª parte)

Aceros	Designación	% Carbono	Precalentamiento recomendado
ACEROS AL NIQUEL	SAE 2015	0.10 – 0.20	Sobre 150 °C
	SAE 2115	0.10 – 0.20	90 °C – 150 °C
	Acero Níquel 2.5 %	0.10 – 0.20	90 °C – 200 °C
	SAE 2315	0.15	90 °C – 260 °C
	SAE 2320	0.20	90 °C – 260 °C
	SAE 2330	0.30	150 °C – 320 °C
	SAE 2340	0.40	200 °C – 370 °C
ACEROS AL CROMO – NIQUEL	SAE 3115	0.15	90 °C – 200 °C
	SAE 3125	0.25	150 °C – 260 °C
	SAE 3130	0.30	200 °C – 370 °C
	SAE 3140	0.40	260 °C – 430 °C
	SAE 3150	0.50	320 °C – 480 °C
	SAE 3215	0.15	150 °C – 260 °C
	SAE 3230	0.30	260 °C – 370 °C
	SAE 3240	0.40	370 °C – 540 °C
	SAE 3250	0.50	480 °C – 600 °C
	SAE 3315	0.15	260 °C – 370 °C
	SAE 3325	0.25	480 °C – 600 °C
	SAE 3435	0.35	480 °C – 600 °C
	SAE 3450	0.50	480 °C – 600 °C
ACEROS AL MOLIBDENO	SAE 4140	0.40	320 °C – 430 °C
	SAE 4340	0.40	370 °C – 480 °C
	SAE 4615	0.15	200 °C – 320 °C
	SAE 4630	0.30	260 °C – 370 °C
	SAE 4640	0.40	320 °C – 430 °C
	SAE 4820	0.20	320 °C – 430 °C
ACEROS AL CROMO	12 – 14% Cr tipo 410	0.10	150 °C – 260 °C
	15 – 18% Cr tipo 430	0.10	150 °C – 260 °C
	23 – 30% Cr tipo 446	0.10	150 °C – 260 °C
ACEROS INOXIDABLES CROMO – NIQUEL	18% Cr – 8% Ni tipo 304	0.07	Estos aceros no requieren precalentamiento
	25% Cr – 12% Ni tipo 309	0.07	
	25% Cr – 20% Ni tipo 310	0.10	
	18% Cr – 8% Cb tipo 347	0.07	
	18% Cr – 8% Mo tipo 316	0.07	
	18% Cr – 8% Mo tipo 317	0.07	

Fuente: INDURA. Manual de Soldadura. Página 97.

4. RECUBRIMIENTOS DE PROTECCIÓN

La industria, en general, hoy en día, reconoce la importancia que representan los recubrimientos de protección en el aumento de la productividad y la disminución de costos. Este procedimiento ha demostrado, a través de un período considerable de tiempo, ser el método más económico para prolongar la vida de los equipos, reduciendo la necesidad de conservar grandes existencias de repuestos y manteniendo en actividad productiva el equipo expuesto a desgaste.

El recubrimiento de protección es el procedimiento de depositar mediante soldadura, una aleación resistente al desgaste sobre una parte metálica para formar una superficie protectora que resista a los desgastes por abrasión, impacto, temperatura, corrosión o una combinación de estos factores.

Esta definición tan amplia, emplea y aplica todos los procesos conocidos de soldaduras como soldadura al arco con electrodos revestidos, soldadura semiautomática Mig, soldadura Tig, soldadura oxiacetilénica y metalización. El recubrimiento puede ser realizado para devolver su forma primitiva a una pieza desgastada. En este caso, el metal de recubrimiento puede ser igual o muy similar al metal base; se trata entonces de un *recubrimiento complementario*.

Si por el contrario, el recubrimiento debe proporcionar a una pieza propiedades particulares, se escoge un material de recubrimiento diferente al metal base. Cuando el material utilizado es duro y resistente al desgaste, se le da la denominación de *recubrimiento duro* a este procedimiento.

4.1 Ventajas económicas del recubrimiento

El aporte de aleaciones resistentes al desgaste es un recurso fácil y económico para mantener la maquinaria y equipos en continuo funcionamiento con el mínimo número de detenciones para reparar o sustituir piezas desgastadas. Los costos de mantenimiento se reducen de varias formas, algunas de ellas son directas y evidentes.

Según la aleación elegida y las condiciones en servicio, las piezas protegidas durarán entre 2 y 20 veces, y aún más que las piezas no protegidas, alargando, por lo tanto, la vida de las piezas en servicio con la consiguiente reducción del número de reparaciones y detenciones.

Es de conocimiento que los metales tenaces no son duros, en consecuencia, si la pieza se construye de un solo material, debemos aceptar como solución una menor resistencia al desgaste para lograr una necesaria seguridad contra posibles roturas. En cambio, si la pieza es diseñada para ser protegida contra el desgaste con material de aporte, generalmente es posible usar un acero al carbono común como material base aplicando sobre la superficie sometida a desgaste una aleación más adecuada, obteniéndose así una pieza compuesta que posee las propiedades deseadas: tenacidad y dureza.

La posibilidad de recuperar una pieza desgastada elimina la necesidad de grandes stocks de repuestos. Se reduce el consumo de energía por la mayor eficiencia en servicio de las piezas recuperadas.

4.2 Factores y tipos de desgaste

Los problemas de desgaste resultan un tanto desconocidos, debido a las formas en que se manifiestan y a los diversos factores que pueden ser de tipo mecánico, físico, cristalográfico, efecto de temperatura, etc.

Se entiende por desgaste, el fenómeno por medio del cual pequeñas partículas de la superficie de trabajo de una pieza son removidas. Este produce frecuentemente una visible disminución en las dimensiones de la pieza afectada. Normalmente, no se presenta un tipo de desgaste aislado; por esta causa no es fácil, en una aplicación determinada, establecer con seguridad el tipo de desgaste que ha tenido lugar.

El sentido lógico que puede ayudar a determinar el desgaste y sus efectos, es el considerar la naturaleza de las superficies en contacto, es decir:

- Desgaste metal – no metal
- Desgaste metal – metal
- Desgaste metal – fluido

En el sentido más amplio de desgaste, éste puede incluir la pérdida de material, debido a factores mecánicos o físicos. Sobre estas ideas se da a continuación una clasificación en que incluye factores mecánicos, térmicos y químicos.

El *desgaste por abrasión* es una acción esmeriladora causada por sólidos abrasivos deslizantes. Este tipo de desgaste puede ser:

- a) Abrasión por esmerilado de baja tensión: Es el resultado de una acción de socavación por pequeñas partículas, tales como arena, polvo o tierra. Un movimiento abrasivo produce virutas de metal. La erosión es una variación de este tipo de desgaste, que ocurre cuando partículas arrastradas por un movimiento rápido de aire o líquido golpean el material.
- b) Abrasión por molienda de alta tensión: Es un desgaste que agrega una fuerza de compresión a la abrasión de baja tensión.
- c) Abrasión por acanalado: Este desgaste combina la abrasión de alta tensión, con impacto, produciendo deformación plástica dentro del metal base.

El *desgaste metal-metal* se produce cuando dos superficies metálicas se rozan entre sí, generando de este modo calor, lo cual hace que irregularidades superficiales se unan para formar una soldadura en frío. Pequeñas porciones de la superficie se desgarran produciendo daños de importancia.

El *desgaste por impacto* es el resultado de una tensión de compresión momentánea; los materiales frágiles son los más afectados con este tipo de desgaste, resultando en una fractura o deterioro gradual.

El *desgaste por temperatura* es una acción que influye sobre estructuras endurecidas por tratamiento térmico, reblandeciéndolas; esto puede causar cambios de fase que incrementa la dureza y fragilidad y puede acelerar el ataque químico, tal como la oxidación y exfoliación.

El *desgaste por corrosión* consiste en el deterioro de un metal como consecuencia de una reacción química o electro-química con el medio.

4.3 Características de los procesos de recubrimiento

La dilución es el porcentaje de metal base que se combina con el material de aporte en el depósito. Este varía ligeramente, dependiendo del proceso de soldadura que se utilice para aplicarla, así como del espesor de material base, tipo de material consumible y la velocidad de deposición expresada en kg/hr. Este porcentaje se calcula mediante la ecuación:

$$\% \text{ Dilución} = \frac{(B)}{(A + B)} * 100$$

Donde A es la sección de material de aporte sobre la superficie del material base y B es la sección de material que penetró en el material base.

Tabla XIII. Características de los procesos de aplicación

Proceso	Material consumible	% Dilución Metal sold.	Espesor mínimo recomendado (mm)	Velocidad deposición (kg/hr)
Arco manual	Electrodo revestido	10 – 30%	2	1 – 3
MIG (CO ₂)	Sólido o tubular	10 – 25%	2	2 – 10
Arco abierto	Tubular	10 – 25%	3	2 – 10
Arco sumergido	Alambre y fdte.	10 – 40%	3	4 – 15
TIG (con argón)	Varilla	10 – 20%	1	0.5 – 2
Oxiacetileno	Varilla y polvo	hasta 10%	0.5	0.5 – 2

4.4 Defectos y soluciones en la aplicación de recubrimientos protectores

La fisuración es el principal defecto que aparece en una soldadura. Esta fisuración puede llegar a producirse cuando el material se encuentre en estado caliente ó frío. La *fisuración en caliente* es un defecto que se representa cuando en el metal aportado o zona de dilución aparecen compuestos químicos, en los límites de grano, de punto de fusión inferior al de éstos. La razón de la fisuración intergranular está en que luego de la solidificación de los granos éstos sufren una contracción por efecto del enfriamiento; esta contracción produce tensiones de tracción entre los granos que la fina capa líquida no puede soportar, apareciendo entonces la fisura; la causa de esta fisura es puramente de orden metalúrgico.

Si este tipo de fenómeno ha ocurrido con un determinado electrodo, su solución es cambiar electrodo, lógicamente, el fabricante de electrodos debe conocer el problema

para poder buscar los medios de poder atenuarlo o evitarlo, agregando elementos que impidan la formación de los mencionados compuestos químicos.

La *fisuración en frío* es notablemente más frecuente que la anterior y este tipo de fisuración aparece sobre los 200 °C, aunque en algunas ocasiones puede aparecer diferida cuando la pieza está totalmente fría, incluso al cabo de muchas horas de haber finalizado un trabajo.

Suelen aparecer casi recta con algunas desviaciones en el metal base, a unos milímetros del cordón de soldadura y paralela a éste. Esto no quiere decir que no se pueda presentar localizada en otras zonas y con diferente forma. Este tipo de fisuración aparece cuando se aparecen las siguientes circunstancias:

- a) Tensiones de tracción: Se originan por todo cordón de soldadura, así mismo, en este tipo de causa incide de forma acentuada el grado de fijación de las piezas a soldar; las piezas se pueden fijar, pero evitando siempre que el conjunto tenga una rigidez excesiva.
- b) Formación de martensita: Originado por los elementos contenidos en el acero y por una rápida velocidad de enfriamiento. En este tipo de causa se hace necesario determinar el llamado carbono equivalente químico, que define el grado de soldabilidad del acero; además, para atenuar la velocidad del enfriamiento, se debe realizar precalentamiento.
- c) Emigración de hidrógeno: Originado por los revestimientos y particularmente por la humedad absorbida o por agua de cristalización de los compuestos químicos que lo forman. Se debe seleccionar metales de aporte con estructura austenítica, a pesar que atenúan bastante el problema no lo eliminan, no obstante se debe buscar que estos electrodos presenten un revestimiento preferentemente básico y tomar la precaución de que cuando se almacenen no absorban humedad.

4.5 Diferencia entre fisuras transversales y grietas

Los depósitos hechos con electrodos de alta aleación deben crear fisuras superficiales. Este tipo de fisuras es muy recomendable ya que reduce los esfuerzos residuales.

Sin las fisuras, los esfuerzos residuales o cerrados, al combinarse con los esfuerzos de servicio, pueden llegar a tal magnitud que ésta sea superior a la resistencia de tracción, ocasionando grietas profundas o exfoliaciones. Si las fisuras no ocurren de forma natural, deberán provocarse para evitar fallas futuras; por ejemplo: a medida que aumenta el calor de las piezas grandes habrá menos ocasiones de que sucedan fisuras transversales. Para ratificar esto, se puede lograr una fisuración forzada esponjando el depósito con un trapo mojado o rociando la superficie con una capa fina de agua; también se pueden acelerar las fisuras durante el período de enfriamiento ocasionalmente golpeando el depósito con un martillo.

Las fisuras transversales son numerosas, espaciadas, muy cerca entre si y no llegan al metal base. Si no ocurren las fisuras transversales en los depósitos de aleación, es probable que aparezcan grietas; las grietas capilares de la interfase pueden surgir a continuación, ocasionando exfoliaciones.

4.6 El hierro fundido y su soldabilidad

El hierro fundido es una aleación que contiene en forma normal hierro, carbono, silicio, manganeso, fósforo y azufre. El contenido de carbono varía del 1.7% al 4.5%, pero la mayoría de las aleaciones comerciales poseen del 2.5% al 3.5%. Este carbono se encuentra integrando la aleación en distintas formas, dando lugar a los siguientes tipos de fundiciones:

Fundición gris: Mediante una adición de 1 a 2 % de silicio y un enfriamiento lento, se consigue que el carbono quede retenido en forma de escamas de grafito libres, en una matriz ferrítica y/o perlítica. Este elemento es blando e imparte el color gris en las fracturas. Produce una buena maquinabilidad y gran capacidad para absorber vibraciones, y aunque su resistencia a la tracción varía de 25,000 a 50,000 lbs./plg² [1,761 a 3,522 kg/cm²] no manifiesta punto de fluencia.

Posee gran resistencia a la compresión, aproximadamente de 2 ½ a 4 veces la de tracción. Su tenacidad y ductilidad varía considerablemente con el tamaño y la forma del grafito, así como con el carbono combinado que permanece como perlita en el enfriamiento.

Fundición blanca: Es una condición en la cual el carbono se encuentra combinado en la forma de carburo de hierro. Recibe su nombre del color blanco en la fractura. Es una estructura totalmente martensítica, su dureza puede alcanzar a 600 BNH, sin embargo, su resistencia a la tracción sólo llega a 20,000 lbs/plg² debido a su bajísima ductilidad. Es una estructura poco usada debido a su extremada fragilidad y se obtiene con un bajo porcentaje de silicio y un enfriamiento rápido, que evita la precipitación del carburo libre.

Fundición atruchada: Es una estructura mixta de las dos anteriores, producida por moldes de paredes enfriadas. Esto produce un rápido enfriamiento en el exterior de la pieza que queda compuesta de una cáscara de fundición blanca y el alma de fundición gris. Con esto se obtiene una buena resistencia a la abrasión en el exterior y una razonable tenacidad y resistencia en el núcleo.

Fundición maleable: Se obtiene de la fundición blanca mediante un adecuado tratamiento térmico que transforma parte del carburo de hierro en carbono libre uniformemente distribuido denominado "Carbón de revenido". De esta forma aumenta

su ductilidad, su resistencia a la tracción y su maleabilidad sobre la fundición gris pudiendo aún doblarse hasta cierto grado.

Fundición nodular: Es una fundición gris a la cual se ha agregado un nuevo elemento, generalmente magnesio (puede ser también cesio, litio, calcio, sodio) que modifica las escamas de grafito en nódulos esféricos más compactos y mejor distribuidos en la matriz, lo cual mejora sus condiciones mecánicas.

Soldabilidad:

Dos factores que son característicos del hierro fundido, son los más importantes en las soldaduras. La baja ductilidad y el alto contenido de carbono.

Las expansiones que se producen en la parte a soldar, pueden producir grandes esfuerzos en otros lugares que generan una fractura. Esto debe ser evitado mediante un precalentamiento total de la pieza y/o en las zonas sometidas a mayores esfuerzos.

El alto contenido de carbono en forma de escamas de las fundiciones grises, influye notablemente en la soldadura, pues si después de soldada la pieza es enfriada demasiado rápido, el carbono no tendrá tiempo de segregarse en forma libre, sino que reaccionará como carburo de hierro, extremadamente duro y frágil con propensión a las grietas e imposible de maquinar. Este enfriamiento rápido se produce a temperatura ambiente, especialmente en piezas de gran masa debido a la gran conductividad térmica del hierro.

Este problema tiene dos soluciones:

- 1) Pre-calentamiento.
- 2) Soldadura a menor temperatura con soldadura no ferrosa de menor punto de fusión y permitiendo cierto enfriamiento entre pases.

El tamaño y la forma en que el grafito libre se encuentra en la fundición, reviste importancia. Mientras más pequeña es la superficie de las escamas o nódulos, en contacto con austenita a temperatura, menor será su dilución. Las escamas en una fundición gris poseen una gran área exterior lo que dificulta su soldabilidad con respecto a la fundición nodular maleable.

Altos porcentajes de fósforo aumentan la tendencia al agrietamiento, en la forma de película líquida intergranular que empobrece la red cristalina. Altos porcentajes de azufre y manganeso dificultan la formación de grafito, afectando a la soldadura.

4.7 Materiales de aporte

Entre los materiales de aporte utilizados con soldadura al arco eléctrico podemos mencionar aquellos que tienen como base el níquel: éstos se utilizan para la reparación y relleno de piezas de hierro fundido, produciendo depósitos que pueden trabajarse fácilmente ya que son de gran ductilidad. Los depósitos son blandos, dúctiles y libres de poros.

Los electrodos "Strong-Cast" ó "Cold-Cast" con base de hierro, son electrodos con un revestimiento especialmente diseñado para usar un mínimo de calor con valores de corriente bajos, junto con una protección del arco esencial para soldaduras satisfactorias en hierro fundido. No se puede maquinar la soldadura efectuada con dicho electrodo, ya que posee una alta dureza el depósito. Dichos electrodos se utilizan en soldaduras de bloque de motores rajados, y como agarre cuando se reemplazan dientes de engranajes en que se necesite reconstruir con acero dulce.

Cuando la necesidad lo amerite, se puede utilizar el proceso de soldadura oxi-acetilénico, utilizando como material de aporte para efectuar la soldadura el bronce o

latón, el cual debe aplicarse utilizando fundente y un precalentamiento de la pieza, así como un postcalentamiento.

Las varillas de hierro fundido permiten obtener depósitos fáciles de trabajar cuando se usa una técnica apropiada de soldadura. Se usa especialmente en las reparaciones de piezas de hierro fundido, para lo cual el trabajo debe estar sujeto a un pre y postcalentamiento apropiado. Se recomienda el uso de fundente apropiado.

4.8 Procedimientos de aplicación

La soldadura del hierro fundido se puede llevar a efecto por dos métodos básicos, los cuales reducen considerablemente las grietas, éstos son:

1. Soldadura en caliente: Para poder efectuar adecuadamente la soldadura del hierro fundido se debe precalentar el material base a 600 °C aproximadamente, siendo enfriado lentamente entre cal después de la soldadura. El precalentamiento, donde sea aplicado, ampliará la zona afectada térmicamente (ZAT), pero conferirá beneficios tales como la reducción de la dureza y mejoramiento de su maquinabilidad.
2. Soldadura en frío: Se utiliza en este caso electrodos con base de níquel, dándole a la pieza un precalentamiento moderado ó simplemente ninguno. Los beneficios que se derivan de la soldadura en frío son: 1) El depósito de níquel puede absorber carbono (del hierro que está siendo soldado) sin llegar a ser duro y frágil, y éste es sustentado sobre un amplio rango de condiciones de enfriamiento. 2) El coeficiente de expansión térmica del metal de aporte es similar al del hierro fundido, lo cual reduce la incidencia de las tensiones de la soldadura.

La habilidad para producir soldaduras sin problemas no depende sólo de la compatibilidad de la soldadura y el método vecino, que puede ser determinado con referencia al tipo de hierro fundido, sino también por la condición de la fundición o fundiciones a ser soldadas, como también por el pre-tratamiento en la preparación de la unión y el procedimiento de soldadura a ocupar. Todas las nuevas fundiciones tienen una "piel" de fundición consistente de productos de reacción desde el molde, partículas de arena y otros contaminantes. Esta superficie debe ser removida por esmerilado, al igual que los alrededores de las caras a ser unidas.

A las fundiciones que deben ser soldadas hay que eliminarles la contaminación por grasa y polvo. Los biseles o chaflanes que se le hacen a las piezas de hierro fundido cuando se van a soldar a tope son aproximadamente de 60-75° para uniones en "V", y de 20-30° para uniones en "U".

Debe tenerse en cuenta que los primeros pases de soldadura son los más críticos, pues debe evitarse la distorsión de las piezas y las tensiones en el cordón de soldadura; dependiendo de los espesores, los diámetros de electrodos deberían ser de 2.5 – 3.5 milímetros. Generalmente, se deberían depositar cordones delgados utilizando amperajes bajos, minimizando así las entradas de calor y las tensiones de soldadura; el avance no debería exceder los 25 milímetros de longitud; la oscilación del electrodo es permisible para obtener un buen comportamiento de los lados de la unión.

Cada cordón, inmediatamente después de ser depositado, debe ser martillado, con el propósito de aplanar irregularidades y reducir tensiones residuales en la soldadura. Esta secuencia deberá ser seguida con una remoción de escoria antes del siguiente pase de soldadura. La manera de encender y apagar el arco es muy importante; el encendido del arco en un borde o esquina puede crear una zona dura, en la cual podrá fallar en servicio.

5. RECUBRIMIENTOS PARA MANTENIMIENTO

5.1 Electrodo de mantenimiento

La selección de recubrimientos de mantenimiento depende de dos condiciones: uso final del equipo y tipo de desgaste que los elementos a utilizar encontrarán. Los materiales para ser empleados en recubrimientos de mantenimiento, generalmente se encuentran como varillas, electrodos, alambres y polvos.

Estos electrodos de mantenimiento se clasifican en cuatro áreas básicas:

1. Aleaciones con base de hierro:

1.1 Materiales de relleno: Estas aleaciones de base de hierro se utilizan generalmente para rellenar una pieza hasta sus dimensiones originales o como base cuando se desea aplicar otro recubrimiento de mayor dureza. Los depósitos son maquinables y ofrecen una buena combinación de dureza y tenacidad sin necesidad de tratamiento térmico. Se incluye un material austenítico para relleno de aceros, además, cumple con resistir el desgaste por impacto, calor y corrosión.

1.2 Baja aleación: Estos son electrodos de base de hierro con menos de 20% de contenido de aleación, generalmente cromo, manganeso, silicio y molibdeno. Las aleaciones de este grupo tienen un rango de dureza de 40 a 50 Rockwell. Muchos de estos materiales son forjables y algunos son maquinables. Se recomienda para piezas sometidas a abrasión con moderado a alto impacto o cuando es importante utilizar un material del menor costo posible.

1.3 Alta aleación: Estos electrodos de base de hierro con más de 20% de contenido de aleación, generalmente cromo, manganeso, silicio, molibdeno, níquel, vanadio, boro, zirconio. Este grupo tiene un rango de dureza de 54 a 60 Rockwell y se recomienda para aplicaciones que incluyen alta abrasión y moderado impacto o alta carga compresiva.

2. Aleaciones de base de cobalto-cromo y níquel-cromo:

Este grupo incluye las aleaciones de base de níquel y base de cobalto, utilizadas generalmente en aplicaciones que impliquen altas temperaturas y/o corrosión acompañadas de abrasión e impacto; los depósitos producen también excelentes superficies de rodamiento debido a sus cualidades antifricción.

3. Aleaciones de base de cobre:

Este grupo comprende aleaciones de cobre con cantidades variables de aluminio, silicio, estaño y zinc, generalmente entregan una buena resistencia al desgaste y la corrosión.

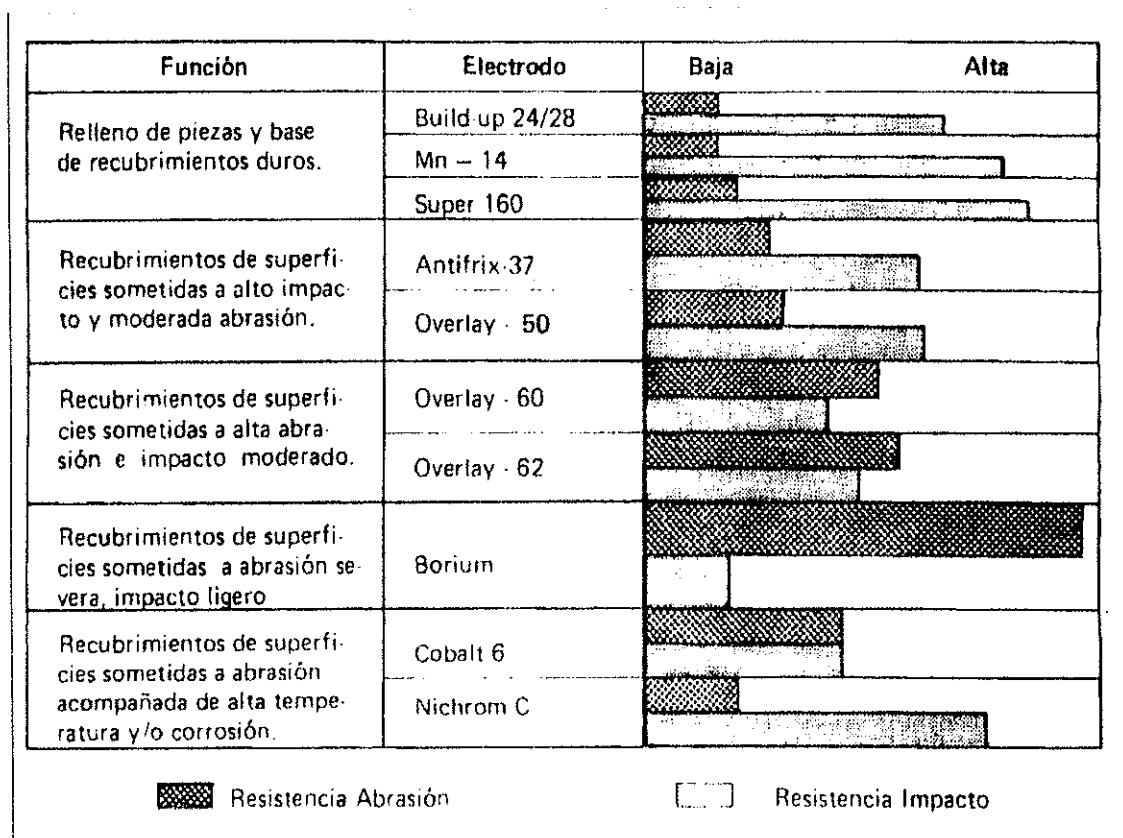
4. Carburo de tungsteno:

Este grupo consiste en carburo de tungsteno fundido en varias formas y se consiguen depósitos más resistentes al desgaste por abrasión y eficiencia de corte sobre equipos de movimiento de tierra.

5.2 Resistencia comparativa al impacto y la abrasión

Se debe elegir el electrodo adecuado para la función que se valla a realizar, ya que su resistencia a la abrasión y al impacto, varían considerablemente.

Tabla XIV. Resistencia comparativa según la función de algunos electrodos



Fuente: INDURA. Manual de soldadura. Página 66.

5.3 Electrodo para recubrimientos duros

En la actualidad existen varias casas matrices que se dedican a la fabricación de electrodos para revestimientos duros. Entre ellas tenemos la UTP, Indura, Lincoln, Hobart, por mencionar sólo algunas. Cada una de ellas se ha visto en la necesidad de crear electrodos que satisfagan las necesidades más extremas de trabajo.

A continuación se mencionarán algunos tipos de electrodos y su aplicación en la industria, así mismo se hará referencia a la dureza que cada uno de ellos presenta.

UTP 63: Es un electrodo de excelentes características, recomendado para la unión, reconstrucción y revestimiento de aceros aleados, aceros al carbono y aceros al manganeso entre sí; además es resistente al desgaste por impacto y fricción. Su dureza es aproximadamente de 200 HB, pudiéndose soldar con corriente alterna o corriente continua con polaridad positiva.

UTP 621: Electrodo de alto rendimiento para revestir piezas sujetas a fuerte desgaste por abrasión e impacto como: cadenas, zapatas, rodillos de zanjadoras, crucetas de trituradora, árboles de agitador, etc. La dureza del depósito oscila entre 45 a 52 Rockwell, utilizando para soldar corriente alterna o corriente continua con polaridad positiva.

UTP 670: Es un electrodo de alto rendimiento para revestimientos duros en piezas de acero, acero fundido y acero al manganeso expuestos a esfuerzos simultáneos de desgaste por presión, impacto y abrasión. Debido a su alto rendimiento, es recomendable para revestimiento de una sola capa. Su dureza oscila entre 56 a 60 Rockwell.

UTP 7200: Electrodo especial para la reconstrucción, unión y revestimiento de aceros al manganeso, que resistan desgastes por severo impacto y abrasión, por ejemplo: dientes de dragas y excavadoras, cucharones de pala mecánica, martillos de molinos, conos de quebradora, y en general en partes de maquinaria para movimiento de tierra. Su dureza varía entre 200 a 250 HB.

Super Alloy: Es una aleación de alto contenido de cromo, níquel y manganeso, que proporciona soldaduras de calidad superior en cualquier tipo de acero al carbono o inoxidable. Su extrema versatilidad, permite que sea empleado para soldar una gran variedad de combinaciones de aceros disímiles. Es maquinable y no responde a tratamientos térmicos.

Borium: Los electrodos o varillas oxiacetilénicas Borium están compuestos por un tubo de acero dulce con cristales de carburo de tungsteno distribuidos homogéneamente en su interior. El carburo de tungsteno es uno de los materiales más duros que se conoce, sin embargo, la dureza del depósito no es un buen índice de su alta resistencia al desgaste.

UTP 730G2: Es un electrodo especial para revestir partes de máquinas y herramientas sometidas a desgastes por abrasión e impacto mediano a temperaturas hasta 500 °C, por ejemplo: punzones, mordazas, válvulas, compuertas, dispositivos para cortar en caliente y en frío, cuchillas para corte en caliente, troqueles, etc.

UTP 711: Electrodo de alto rendimiento, desarrollado a partir de carburos de cromo, ideal para resistir desgastes por alta abrasión y ligero impacto. Aplicaciones principales: cuchillas de bulldozer, barrenas extractoras de carbón, horquillas de plata hojas de alimentador, etc.

CONCLUSIONES

1. Todos los aceros con alto contenido de carbono cuando se precalientan antes de efectuar la operación de soldadura, reducen el nivel de esfuerzos en la unión soldada.
2. El cálculo del carbono equivalente es de suma importancia, ya que nos permite determinar cuando un acero debe ser tratado térmicamente.
3. Todos los aceros con alto contenido de carbono después de haber sido soldados, si no se sumergen en un medio que les permita enfriarse más lento que el ambiente, se producirán tensiones en la soldadura y un endurecimiento perjudicial en el metal base debido a la transformación de la estructura cristalina de dicho metal.
4. La organización AISI – SAE identifica la composición química de los aceros, por medio de asignarles una numeración de 4 dígitos. Los dos primeros indican los principales elementos aleantes en el acero, y los otros dos, el contenido nominal de carbono en 1/100 de porcentaje.
5. En los aceros inoxidables, si no se sueldan con la máxima velocidad posible, se produce la precipitación de carburos debido a la alta temperatura que se genera por el arco eléctrico producido entre el electrodo y el material base.
6. Los aceros inoxidables tienden a corroerse cuando el contenido de carbono es superior de 0.03%, cuando el contenido de cromo es bajo y después de un tratamiento térmico entre los 500 °C y 700 °C.

RECOMENDACIONES

1. Para soldar aceros inoxidable se debe emplear el proceso GTAW y como gas de protección el argón, pues las adiciones de hidrógeno (6 a 15%) elevan la velocidad de avance.
2. Para reducir el endurecimiento en la zona afectada térmicamente y el nivel de esfuerzos en la unión soldada, se debe precalentar la pieza a soldar.
3. Para reducir las tensiones y la fragilidad en los aceros, ocasionadas por el temple, se debe utilizar el tratamiento térmico llamado Revenido.
4. Después de haber efectuado una soldadura en un acero con alto contenido de carbono, éste deberá sumergirse entre cal para que se enfríe lentamente; evitando así la tendencia al agrietamiento.
5. Para evitar que el acero inoxidable se pandee y se tuerza, se debe emplear la corriente más baja posible o soldar con la máxima velocidad.
6. Se debe aplicar recubrimiento duro a aquellas piezas que están sometidas a desgastes por abrasión, impacto, temperatura, corrosión; ya que esto aumentará la productividad y la disminución de costos.
7. Antes de efectuar una soldadura en un acero, se debe consultar al distribuidor de electrodos sobre las propiedades y características, no sólo del material de aporte sino que también del material base.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Timoshenko, S. y Godier. **Resistencia de materiales**. Segunda Edición. México: Editorial Iberoamérica. 1986. p.p. 1 – 20.
2. Deutschman, Aarón y Walter J. Michels. **Diseño de máquinas**. 4ª. imp. México: Editorial CECSA. 1991. p.p. 29-50, 70-79, 94-115.
3. Horwitz, Henry. **Soldadura Aplicaciones y Práctica**. México: Alfaomega. 1990. p.p. 505-534.
3. Villegas Urquidi, Mario. **Soldadura**. Traducción y adaptación. México: Centro Regional de ayuda Técnica. McGraw Hill. 1971.
4. Lana Sarrate, C. **Metalografía y tratamientos térmicos de hierros y aceros**. Madrid: Espasa – Calpe, S.A. 1969.
5. INDURA. **Manual de soldadura**. Santiago: Centro Técnico INDURA-CETI. 1990. p.p 1-10, 18-23, 30-32, 45.
6. INDURA. **Usos y aplicaciones de los electrodos**. Informativo mensual (31): 6-8. 1994.

BIBLIOGRAFÍA

1. CARTAGENA Palomo, Julio. **Tratamientos térmicos del acero.** Tesis Ing. Mecánico. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. 1986.
2. CRUZ, Juan Francisco. **Soldadura de aceros inoxidables.** Tesis Ing. Mecánico. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería 1988.
3. EUTECTIC & CASTOLIN. **Manual de procesos y aleaciones.** Canadá: Editorial Eutectic Corporation. 1988.
4. HOBART. **Manual de bolsillo para soldar mejor.** Guatemala: Electrodo de Centroamérica. 1980.
5. INDURA. **Aceros inoxidables.** Informativo mensual (30): 4 - 7. 1994.
6. UTP. **Manual de soldaduras especiales.** México: UTP Industria Mexicana S.A. 1980.