

ACEROS INOXIDABLES

Curso de Metalurgia Física

Ingeniería Mecánica – Ingeniería Naval

Prof: Mario González

2da Edición

Octubre 2004

Introducción

La estabilidad superficial de los aceros comunes, estructurales, de construcción etc, y la simple exposición a la atmósfera de la superficie desnuda, resulta en una acentuada oxidación. De manera similar, es baja la resistencia al ataque de otros medios gaseosos y líquidos habituales.

Los aceros inoxidables constituyen una familia de aleaciones donde el cromo es el elemento crítico, cuya resistencia a la corrosión es su característica más notable. La estabilidad superficial de estas aleaciones les permite resistir atmósferas agresivas y, también, la acción de medios líquidos de diversa naturaleza. Estas características les ha abierto un apreciable campo de utilización con fines protectores, decorativos y hasta estructurales. Por su resistencia en medios líquidos encuentran gran aplicación en las industrias química, alimenticia, etc.

La resistencia a la oxidación de los aceros inoxidables se extiende también en aplicaciones criogénicas y a altas temperaturas. Mediante adiciones y tratamientos apropiados es posible otorgarles una apreciable resistencia a deformación a alta temperatura y a termofluencia (creep).

Los primeros estudios publicados acerca de los aceros inoxidables fueron hechos por metalurgistas franceses y alemanes entre 1904 – 1909. Estos ya clasificaban los aceros en austeníticos, ferríticos y martensíticos.

La utilidad industrial de estos aceros comenzó a ser evidente entre 1910 – 1915 apoyada en los trabajos de Harry Brearley en Inglaterra (martensíticos), Frederick Becket and Christian Dantszen en EEUU (ferríticos) y Eduard Maurer and Benno Strauss en Alemania (austeníticos).

Posteriormente se llevaron a cabo investigaciones sobre propiedades y estructura, tratamientos térmicos y el rol de los elementos de aleación que lideraron el desarrollo de los aceros de endurecimiento por precipitación próximo al año 1940. El alto costo del níquel que sobrevino como consecuencia de la segunda guerra mundial, trajo como consecuencia el desarrollo de los aceros de alto manganeso, el cual reemplazó al níquel en los austeníticos.

Aunque los aceros duplex que contienen ferrita y austenita fueron descubiertos en 1930, su desarrollo comercial no ocurrió hasta 1960 cuando el estudio de aleaciones con superplasticidad y aleaciones ferrítico – austeníticas de grano fino renovaron el interés en estos materiales.

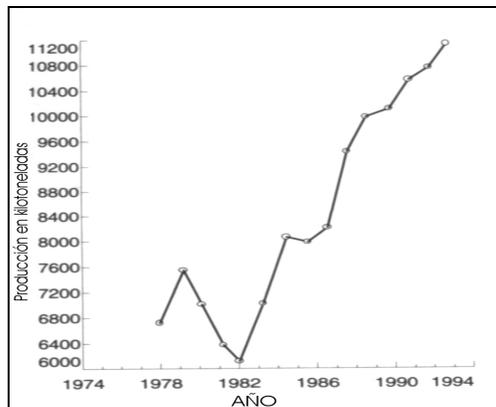


Figura 1: Evolución de la producción mundial de acero inoxidable

El siguiente paso significativo en la tecnología de los aceros inoxidables fue el desarrollo del proceso de decarburación por argón-oxígeno (AOD) que entró en operación en 1968. Este y otros desarrollos alternativos o suplementarios de refinación tales como decarburación con oxígeno en vacío, fundición por inducción en vacío, refundido mediante arco al vacío, etc, hizo posible la producción de una gran variedad de nuevas aleaciones.

Su uso se ha extendido por ejemplo a generación de energía donde esas propiedades son deseables.

Debido a estas características y a las mejoras que se han operado en los procesos de fabricación

reduciendo costos, el consumo mundial de estos aceros ha ido creciendo constantemente en los últimos años, aumentando la importancia de su estudio a todos los niveles.

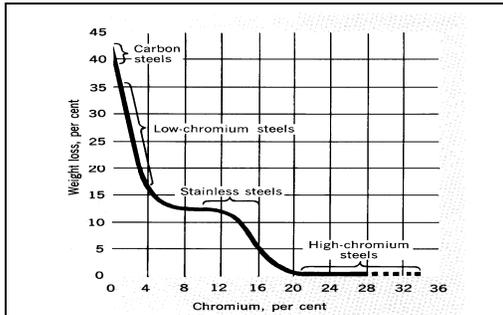


Figura 2: Resistencia a la oxidación a altas temperaturas

La resistencia a la corrosión de los aceros con alto contenido de cromo, se asocia a la formación de una película invisible y adherente de óxido rico en cromo sobre la superficie del acero. Esta es una película impermeable la cual inhibe las posibles reacciones químicas impidiendo la difusión de átomos reactivos a través de ella, constituyendo una barrera de pasivación. La estabilidad de esta barrera, que puede ser afectada por medios físicos, químicos o mecánicos, aumenta con el contenido de cromo y con el contenido de algunos otros elementos de aleación

y comienza a ser efectiva a partir de aproximadamente un 11 % de cromo.

En general, los aceros inoxidable contienen más de 11 % de cromo y en muy pocos su contenido es superior al 30 %.

Con restricciones específicas para cada tipo, los aceros inoxidable pueden ser conformados y fabricados por procesos convencionales. Pueden ser usados en su condición de fundidos o se pueden producir diversas formas por técnicas de metalurgia de polvos. Los lingotes fundidos pueden ser laminados o forjados y se pueden producir productos planos (láminas, tiras o placas) en procesos continuos. Los productos laminados pueden ser además, trafilados, doblados, extrudados o trenzados en forma de cables. Así mismo, se pueden obtener formas por maquinado y pueden ser unidos por soldadura del mismo material o materiales disímiles. Los aceros inoxidable pueden ser también usados como recubrimiento de otras láminas (cladding) de aceros o materiales no ferrosos.

Las características a tener en cuenta en el diseño y selección de aceros inoxidable son:

1. Resistencia a la oxidación y a la corrosión adecuada al medio en que han de operar y estabilidad de estas propiedades a altas temperaturas.
2. Propiedades mecánicas tales como resistencia, ductilidad y tenacidad a temperatura ambiente y de servicio.
3. Propiedades físicas tales como conductividad térmica y eléctrica y propiedades magnéticas.
4. Propiedades tribológicas tales como resistencia a la abrasión, a la erosión y a la fricción.
5. Características de trabajado y fabricación tanto en frío como en caliente, maquinado, forjado, laminado, conformado, etc.
6. Soldabilidad, especialmente influencia de los procesos de soldadura sobre la resistencia a corrosión, oxidación y creep.
7. Características relacionadas con la terminación superficial y/ reflectividad.
8. Costos. Tanto de producción y fabricación como de funcionamiento y mantenimiento.

Designación de los aceros inoxidable

En los EEUU los grados de aceros inoxidable generalmente son designados por un sistema de numeración de AISI (American Iron and Steel Institute) y por sistema unificado de

numeración UNS (Unified Number System), que comprende una amplia lista de aleaciones metálicas entre las que se encuentran los aceros inoxidable. También existen designaciones asignadas por los propietarios de aleaciones.

En Europa se ha unificado un sistema de designación a través de la Euronorm 10088-2 que consiste en: un nombre que hace referencia a los elementos de aleación (ej. X5CrNi18-10) y un número de designación para la aleación (ej. 1.4301). Esta norma ha unificado la norma francesa (NF) y la norma alemana (DIN).

El sistema de designación en Japón tiene mucha similitud con el de AISI. Las aleaciones se designan con un código que comprende una serie de letras más un número de 3 cifras el cual coincide en general con la designación de AISI.

Dada la extensión que ha alcanzado a nivel mundial y en particular en nuestro país la designación de AISI, se tomará ésta como referencia en este texto, complementada por el sistema UNS, ya que su aplicación se está extendiendo.

El número de AISI es el más viejo de los sistemas en los EEUU. La mayoría de los grados tienen una designación de 3 dígitos, las series 200 y 300 son generalmente aceros austeníticos, mientras que la serie 400 comprende a los ferríticos o martensíticos. Algunos de los grados tienen además 1 o 2 letras que indica alguna particular modificación de la composición original.

El sistema UNS incluye un número considerablemente mayor de acero inoxidable que AISI porque incorpora los más recientes desarrollos de éstos. El sistema UNS para inoxidable consiste en una letra (S) seguido de un número de 5 dígitos. Para todas las aleaciones que tienen una designación AISI los primeros 3 dígitos de UNS generalmente coinciden con el número de AISI. Cuando los últimos 2 dígitos de UNS son 00 el número designa un grado básico de AISI. Para aceros inoxidable que contienen alto contenido de níquel (25 a 35 %) la designación consiste de una letra N seguido por un número de 5 dígitos.

Tipos de aceros inoxidable

Los aceros inoxidable pueden ser clasificados en 5 familias. Cuatro de estas familias están basadas en las características de la estructura cristalográfica (microestructura). Estas familias son ferríticos, austeníticos, martensíticos y duplex (austenita más ferrita).

La quinta familia son los aceros de endurecimiento por precipitación, designación que está más relacionada con los tratamientos térmicos que con la microestructura.

Aceros inoxidable ferríticos.

Su nombre lo deben a que tienen estructura cúbica centrada en el cuerpo (bcc) que es la misma que tiene el hierro a temperatura ambiente. Son aleaciones magnéticas y no pueden ser endurecidas por tratamiento térmico. En general, los aceros ferríticos no tienen alta resistencia mecánica, su límite de fluencia en la condición de recocido se encuentra en el rango de 210 a 350 MPa. Su pobre tenacidad y susceptibilidad a la sensibilización constituye una limitación para su fabricación y el tamaño de sección que se puede usar. Su principal ventaja es su resistencia a la corrosión bajo tensiones (SCC) en presencia de cloruros, resistencia a la corrosión atmosférica, y resistencia a la oxidación relativa a un bajo costo.

Los aceros ferríticos contienen entre 11 y 30 % de Cr, con pequeñas cantidades de elementos como C, N, y Ni. Su uso en general depende del contenido de Cr. Los aceros de bajo cromo (11 %, tipos AISI 405 – S40500 y 409 - S40900) son los aceros ferríticos que últimamente tienen más amplio uso. Son fácilmente trabajables y de bajo costo y han ganado una muy buena aceptación en la industria de fabricación de sistemas de escapes de automóviles.

Los aceros de contenido de cromo intermedio (16 a 18 %, tipos AISI 430 – S43000 y 434 - S43400) son usados para accesorios en la industria automotriz y utensillos de cocina. Estas aleaciones poseen menos trabajabilidad que los aceros de bajo cromo.

Los aceros de alto cromo (19 a 30 %, tipos AISI 442 – S44200 y 446 – S44600) a los cuales se los denomina como superferríticos (ver figura 3) son usados para aplicaciones que requieren alta resistencia a la oxidación y a la corrosión. Su fabricación es posible en base a las técnicas de fundición de bajo contenido de carbono y nitrógeno. También se agregan elementos estabilizadores como titanio y niobio para prevenir la sensibilización y proveer tenacidad y buenas propiedades en la soldadura.

Aceros inoxidables austeníticos

Estos constituyen la más grande familia de inoxidables en términos de usos y cantidad de aleaciones disponibles. Al igual que los ferríticos no pueden ser endurecibles por tratamiento térmico. Las aleaciones austeníticas son no magnéticas y su estructura es cúbica centrada en las caras (fcc) del mismo tipo que tiene el hierro alta temperatura (900 a 1400 °C). Ellas poseen excelente ductilidad, formabilidad y tenacidad aún a temperaturas criogénicas. Adicionalmente estos aceros pueden ser sustancialmente endurecibles por trabajado en frío.

Aunque el níquel es el principal elemento utilizado para estabilizar la austenita, el carbono y el nitrógeno también contribuyen porque son fácilmente solubles en austenita. Un amplio rango de resistencia a la corrosión se puede alcanzar balanceando los elementos estabilizadores de la ferrita y los estabilizadores de la austenita.

Los aceros austeníticos pueden ser divididos en 2 categorías: aleaciones al cromo-níquel tales como los tipos AISI 304 – S30400 y 316 - S31600 y aleaciones al cromo, manganeso y nitrógeno tales como los tipos AISI 201 – S20100 y 18-2Mn – S24100. Este último grupo generalmente contiene menos níquel y mantiene la estructura austenítica con altos niveles de nitrógeno. El manganeso es necesario en los aceros de bajo níquel para incrementar la solubilidad del nitrógeno en austenita y prevenir la transformación martensítica. Adicionalmente el nitrógeno incrementa la resistencia de fluencia, por ejemplo una aleación de alto nitrógeno puede tener una resistencia de fluencia de 500 MPa contra un valor de 200 a 275 MPa que tiene una aleación cromo-níquel recocida.

El grado de endurecimiento por trabajado en frío depende de los elementos de aleación, particularmente los estabilizadores de la austenita. Debido a que el mecanismo de endurecimiento está relacionado con una transformación de la austenita la estabilidad de ésta condiciona dicho endurecimiento.

Los aceros que tienen bajo contenido de elementos de aleación, tales como los tipos AISI 201 (S20100), 301 (S30100) y 304 (S30400), frecuentemente se tornan magnéticos cuando se les aplica suficiente trabajado en frío o son altamente deformados en las operaciones de mecanizado y conformado, debido a que sufren una transformación a martensita. No obstante, esto es una ventaja porque incrementa la resistencia al desgaste por deslizamiento o fricción.

Otra propiedad que depende de los elementos de aleación es la resistencia a la corrosión. La adición de molibdeno por ejemplo, que da origen a los aceros tipo AISI 316 (S31600) y 317 (S31700) incrementa la resistencia en medios con cloruros. Los aceros con alto cromo como los tipo AISI 309 (S30900) y 310 (S31000) son usados en medios oxidantes y aplicaciones de altas temperaturas.

Para prevenir la corrosión intergranular de los aceros que han sido sometidos a altas temperaturas, se hacen agregados de titanio y niobio para estabilizar al carbono (AISI 321 y 347). También la limitación del contenido de carbono, como en los aceros con sufijo L (ej:

304L – S30403) ha sido establecida para evitar la corrosión intergranular. Los aceros con más alto contenido de níquel (32 a 38 %) son los de mayor resistencia a la corrosión son clasificados como aleaciones de base níquel. Las aleaciones que contienen níquel, molibdeno (aprox. 6 %) y nitrógeno (aprox. 0.2 %) frecuentemente son clasificados como superausteníticos (figura 3).

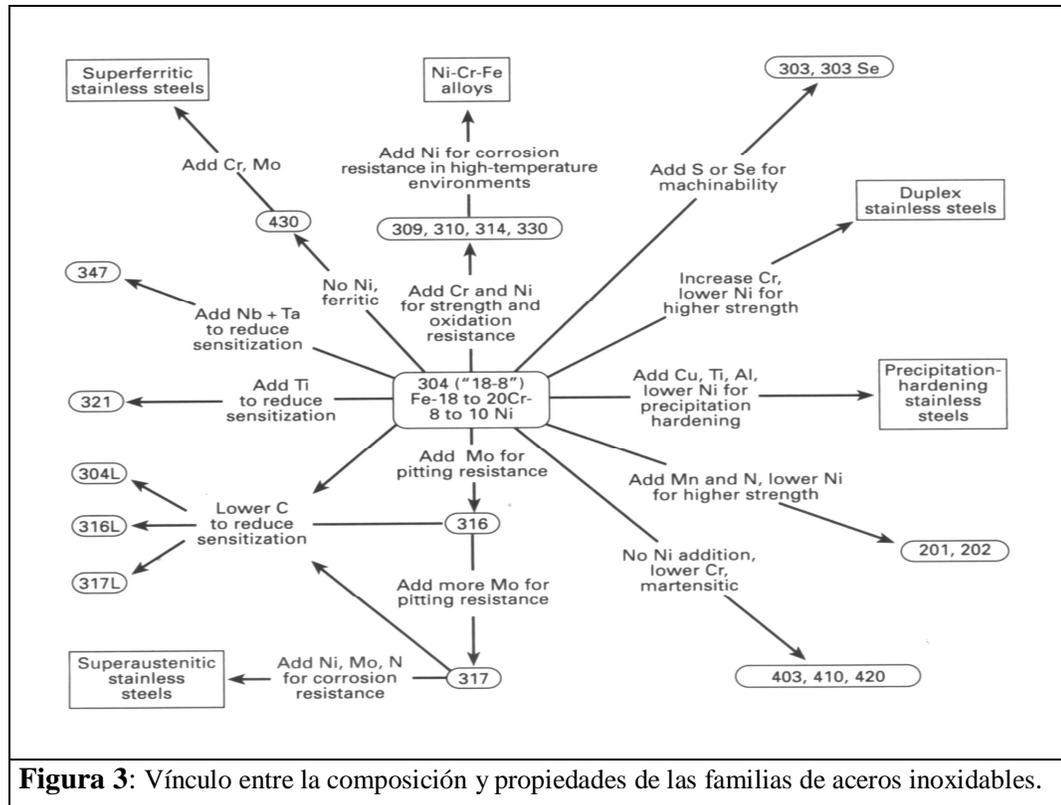


Figura 3: Vínculo entre la composición y propiedades de las familias de aceros inoxidable.

Aceros inoxidable martensíticos

Estos aceros tienen cierta similitud con los aceros al carbono que han sido austenizados, endurecidos por temple y luego revenidos para incrementar la ductilidad y tenacidad. Estas aleaciones son magnéticas y su estructura tratada térmicamente es tetragonal centrada en el cuerpo (bct). En su condición de recocido tienen una resistencia de fluencia del orden de 275 MPa y generalmente en esta condición pueden ser maquinadas, conformadas y trabajadas en frío.

La resistencia obtenida por tratamiento térmico depende del contenido de carbono de la aleación. El incremento del carbono aumenta la resistencia y dureza pero en detrimento de la ductilidad y tenacidad. La aleación más común de esta familia es la tipo AISI 410 (12 % Cr, 0.1 % C). Estas son generalmente revenidas en el rango de durezas de 20 a 40 HRC. En las aleaciones AISI 420, 440A, 440B y 440C se incrementan el contenido de carbono y cromo. La primera de ellas con 0.3 % de C y 14 % Cr pueden alcanzar durezas de 50 HRC. En el rango de 0.6 a 1.1 % de C con 16 % Cr (440A, 440B y 440C) se alcanzan durezas de 60 HRC y resistencia a la fluencia de 1900 MPa. La cantidad de carburos primarios se incrementa con el contenido de carbono en las aleaciones de alto carbono (0.6 - 1.1 % C).

La resistencia al desgaste de los aceros martensíticos depende del contenido de carbono. Por ejemplo el acero 440C con un contenido de 1.1 % tiene una excelente resistencia al desgaste

por abrasión y adhesivo, similar a la de los aceros para herramientas, mientras que la resistencia del tipo 410 es relativamente pobre.

El agregado de níquel y molibdeno incrementa la resistencia a la corrosión y tenacidad. El níquel también sirve para mantener la deseada estructura martensítica y prevenir la presencia de ferrita libre cuando se incrementa el contenido de cromo para aumentar la resistencia a la corrosión. Sin embargo, la adición de elementos es restringida porque en altas cantidades puede resultar en una estructura no completamente martensítica.

Aceros inoxidables endurecibles por precipitación (PH)

Son aleaciones de cromo – níquel que pueden ser endurecibles por un tratamiento de envejecido. Estos son clasificados en austeníticos (AISI A286, UNS S66286), semiausteníticos (AISI PH17-7, UNS S17700) o martensíticos (AISI PH 17-4, UNS S17400). La clasificación está determinada por la microestructura obtenida en el tratamiento de solución. Los semiausteníticos, son aceros cuyo tratamiento de solución es tal que ocurre una transformación parcial de austenita a martensita. Muchas veces se usa trabajado en frío para facilitar la reacción de envejecimiento. Se utilizan varios elementos de aleación para alcanzar el efecto deseado en el envejecimiento. Estos pueden ser aluminio, titanio, niobio o cobre. Estos generalmente forman compuestos intermetálicos o en el caso de S17400 finos precipitados de cobre.

Así como aceros los martensíticos las aleaciones PH pueden alcanzar altas resistencias de fluencia de hasta 1700 MPa. Estos aceros generalmente tienen buena ductilidad y tenacidad con moderada a buena resistencia a la corrosión. Se alcanza una mejor combinación de resistencia mecánica y a la corrosión que con las aleaciones martensíticas. Estas son debido a su más alto contenido de cromo, níquel y molibdeno así como a su contenido de carbono más restringido (0.04 max.). Este contenido tan bajo de carbono es especialmente crítico para una buena ductilidad y tenacidad. Sin embargo, esto implica una baja resistencia al desgaste de estas aleaciones.

El más conocido de los aceros PH es el S17400 el cual contiene cromo y níquel como todos los demás, cobre para favorecer el endurecimiento en el tratamiento de envejecimiento y niobio para estabilizar el carbono. Los elementos que permiten alcanzar el endurecimiento por envejecimiento en otras aleaciones son titanio (S45500), aluminio ((S13800) y niobio (S45000). El carbono es normalmente restringido, con la excepción de aleaciones semiausteníticas tales como S35500, donde se requiere carbono para proveer la transformación de fase deseada.

Aceros inoxidables duplex

Son aceros al cromo – níquel – molibdeno cuya composición está balanceada para obtener una mezcla de austenita y ferrita. Esta estructura duplex resulta en una mejor resistencia a la resistencia a la corrosión bajo tensiones y picado, comparado con los austeníticos y una mejor ductilidad y tenacidad comparados con los ferríticos. Son capaces de alcanzar una resistencia de fluencia de 550 a 690 MPa en su condición de recocido, lo cual es el doble del nivel de resistencia de cualquiera de las fases por si sola.

La aleación original de esta familia fue predominantemente ferrítica (S32900). La adición de nitrógeno, propia de las aleaciones S32950 y S31803, incrementa la austenita hasta aproximadamente un 50 %. Adicionalmente, el nitrógeno mejora las propiedades de corrosión en soldaduras, resistencia a la corrosión en cloruros y tenacidad. La mejor tenacidad está relacionada con la mayor cantidad de austenita.

Propiedades físicas y mecánicas de los aceros inoxidables

Las propiedades físicas y mecánicas de los aceros inoxidables son bien diferentes de las aleaciones no ferrosas mas comúnmente usadas tales como aleaciones de cobre y de aluminio. Sin embargo, cuando se comparan varias familias de inoxidables con aceros al carbono, existen muchas similitudes aunque también existen muchas diferencias importantes.

En lo relacionado con las propiedades físicas existen tres que son de suma relevancia para el uso de las aleaciones metálicas. Estan son: resistividad eléctrica, conductividad térmica expansión térmica.

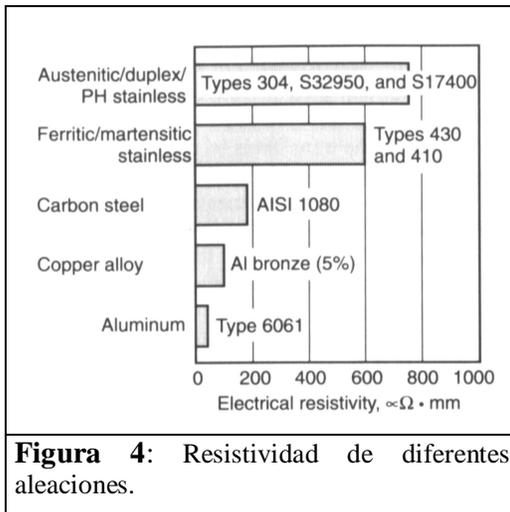


Figura 4: Resistividad de diferentes aleaciones.

La figura 4 muestra una comparación de la resistividad entre diferentes aleaciones entre las que se incluyen distintas familias de inoxidables. La adición de elementos de aleación tiende a incrementar la resistividad por lo que los austeníticos, duplex y aceros PH tienen mayor resistividad que los ferríticos y martensíticos y estos a su vez tienen una mayor resistividad que un acero al carbono 1080. Con respecto a otras aleaciones como el bronce al aluminio al 5%, la resistividad es aproximadamente 7,5 veces mayor y respecto a la aleación de aluminio tipo 6061 (Al, 1Mg, 0,6Si, 0,3Cu, 0,2Cr) es del orden de 20 veces mayor.

La figura 5 muestra la comparación de la conductividad térmica entre los mismos materiales de la figura 4. El comportamiento tiene similitud con el inverso a lo mostrado en la figura 4.

Para los aceros inoxidables la adición de elementos de aleación, especialmente níquel, cobre y cromo disminuyen en forma considerable la conductividad térmica.

La expansión térmica, figura 6, es mayor para la aleación de aluminio 6061 seguido por la aleación de bronce al aluminio y los aceros inoxidables austeníticos y luego por aleaciones ferríticas y martensíticas.

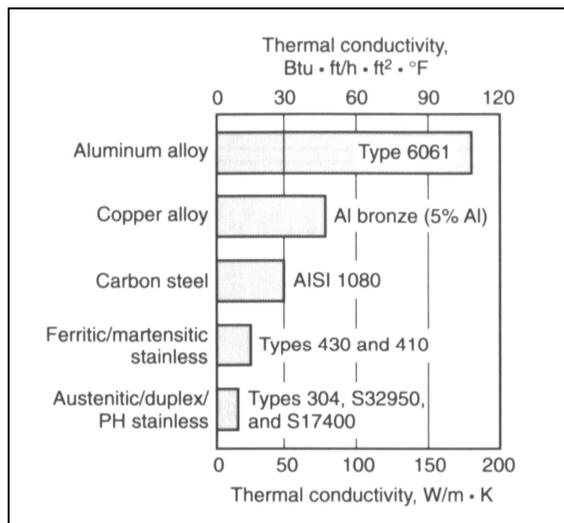


Figura 5: Conductividad térmica comparativa.

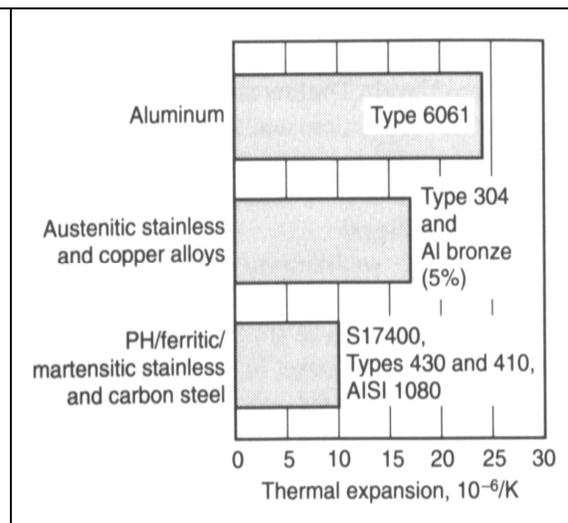


Figura 6: Expansión térmica comparativa.

Para los aceros austeníticos la adición de níquel y cobre decrecen la expansión térmica.

En lo que respecta a las propiedades mecánicas, con fines comparativos se han seleccionado los grados más típicos de aceros inoxidable, algunos de ellos en diferentes grados y se han listado en la tabla 2 junto con el acero al carbono AISI 1080 la aleación de aluminio tipo 6061 y una aleación de cobre con 5 % de aluminio.

Los aceros austeníticos incluidos en la tabla tienen en general, una baja resistencia a la fluencia comparada con la aleaciones tratables térmicamente, pero en contrapartida tienen una alta ductilidad y tenacidad.

Dos de las aleaciones, S20161 y S21800 fueron específicamente desarrolladas para alcanzar una muy buena resistencia al desgaste por adhesión y abrasión en contacto metal – metal.

Así mismo se ha incluido un acero de alto níquel N08020 (33%) catalogado como superaustenítico para uso en ambientes corrosivos altamente agresivos.

Tabla 1. Propiedades de inoxidables seleccionados relativas a otras aleaciones.

Tipo UNS o AISI	Condición	Dureza Rockwell	Propiedades medias de tracción				Charpy (J)
			Fluencia 0.2 % (MPa)	Resist. Max. (MPa)	Elong. (%)	Estricc. (%)	
Inoxidables austeníticos							
304	Recocido	81 HRB	241	586	60	70	≥ 325
N8020	Recocido	84 HRB	276	621	50	65	271
S20161	Recocido	93 HRB	365	970	59	64	≥ 325
S21800	Recocido	95 HRB	414	710	64	74	≥ 325
Inoxidables ferríticos							
405	Recocido	81 HRB	276	483	30	60	
430	Recocido	82 HRB	310	517	30	65	217
Inoxidables duplex							
S32950	Recocido	100 HRB	570	760	38	78	157
Inoxidables martensíticos							
410	Recocido	82 HRB	276	517	35	70	-
	Temp. en aceite desde 1010 °C, Revenido a 250°C	43 HRC	1089	1337	17	62	76
	Temp. en aceite desde 1010 °C, Revenido a 593°C	26 HRC	724	827	20	63	52
420	Recocido	92 HRB	345	655	25	55	-
	Temp. en aceite desde 1038 °C, Revenido a 316°C	52 HRC	1482	1724	8	25	20
440C	Recocido	97 HRB	448	758	14	30	-
	Temp. en aceite desde 1038 °C, Revenido a 316°C	57 HRC	1896	1975	2	10	2

Tipo UNS o AISI	Condición	Dureza Rockwell	Propiedades medias de tracción				Charpy (J)
			Fluencia 0.2 % (MPa)	Resist. Max. (MPa)	Elong. (%)	Estricc. (%)	
Inoxidables de endurecimiento por precipitación							
S45500	Recocido	31 HRC	793	1000	14	70	-
	Temp. agua desde 1038°C, envej. 250°C	49 HRC	1620	1689	10	45	12
	Temp. agua desde 1038°C, envej. 250°C	40 HRC	1207	1310	15	55	47
S17400	Recocido	31 HRC	793	965	12	50	-
	Temp. agua desde 1038°C, envej. 482°C	44 HRC	1262	1365	15	52	21
	Temp. agua desde 1038°C, envej. 621°C	33 HRC	869	1131	17	59	75
Aceros al carbono							
1080	Recocido	97 HRB	455	821	15	22	-
	Temp. en aceite desde 816 °C, Revenido a 204°C	42 HRC	980	1304	12	35	-
Aleaciones de aluminio							
	Recocido	-	55	124	25	-	-
	Envejecido	56 HRB	276	311	12	-	-
Aleaciones de cobre (95Cu-5Al)							
	Recocido	45 HRB	173	380	65	-	-

Los aceros inoxidables ferríticos listados (405 y 430) tienen una resistencia de fluencia similar a los grados austeníticos pero los valores de la resistencia máxima, ductilidad y tenacidad mucho más bajos. Sin embargo, la resistencia, ductilidad y tenacidad son excelentes comparados con otros materiales como la aleación 6061 y la aleación de cobre con 5 % de aluminio.

El acero inoxidable duplex, (S32950) tiene el doble de la resistencia de fluencia de los austeníticos y ferríticos y aproximadamente la mitad de la tenacidad. No obstante su tenacidad es bastante superior a la de las aleaciones endurecibles por tratamiento térmico.

Las aleaciones martensíticas tienen la particularidad de que su resistencia, ductilidad y tenacidad presentan un rango de variación muy amplio. En la condición de recocido sus propiedades son similares a la de los ferríticos, pero al incrementar del contenido de carbono se incrementa su resistencia y decae la ductilidad. Las aleaciones de alto carbono (440A, 440B y 440C) son generalmente revenidas a baja temperatura (hasta 330°C) para maximizar su resistencia.

Los aceros PH martensíticos como los grados S45500 y S17400 recocidos tienen más alta resistencia y más baja ductilidad que los martensíticos. Su resistencia después de envejecidos

depende de la cantidad de elementos endurecedores y la temperatura de envejecimiento. La tenacidad es similar o superior a la de los martensíticos para el mismo nivel de resistencia.

Meturgia y propiedades de los aceros inoxidables procesados

Los aceros inoxidables procesados son una clase muy importante de las aleaciones de ingeniería usadas en un muy amplio rango de aplicaciones y muchos medios diferentes. Están basados fundamentalmente en sistemas tales como hierro-cromo, hierro-cromo-carbono, hierro-cromo-níquel, pero pueden contener una serie de elementos de aleación que alteran su microestructura y propiedades.

La naturaleza de inoxidable se alcanza con la adición de cromo con un mínimo de 11 %. Este nivel de cromo asegura la formación, sobre la superficie, de una película continua de óxido rica en cromo. En la practica, sin embargo, aceros con contenido tan bajos como 9 % pueden tener buen comportamiento a la corrosión atmosférica a temperatura ambiente. En general, son muy pocos los aceros inoxidables poseen contenidos de cromo comprendidos entre 30 % y 50 %.

Ya se ha hablado acerca de su clasificación por la microestructura. A los efectos de controlar la microestructura y propiedades un cierto número de elementos de aleación son agregados a los sistemas básicos (Fe-Cr; Fe-Cr-C; Fe-Cr-Ni). Estos incluyen elementos tales como manganeso, silicio, molibdeno, niobio, titanio y nitrógeno. A los efectos de describir la influencia de la composición sobre la microestructura, para un rango muy amplio de aceros inoxidables, se ha desarrollado el concepto de cromo equivalente y níquel equivalente como forma de normalizar el efecto de los restantes elementos, respecto a la influencia que ejercen el cromo y el níquel sobre la microestructura. Esta influencia se relaciona con la posibilidad de estabilización de la austenita por parte del níquel y la estabilización de la ferrita por parte del cromo. Esto es, a mayor cantidad de níquel se amplía en campo de existencia de la austenita (hierro γ) y a mayor cantidad de cromo se expande el campo de existencia de la ferrita (hierro α).

Graficando el cromo y níquel equivalentes sobre ejes coordenados se puede establecer la correlación entre composición y microestructura para aceros inoxidables.

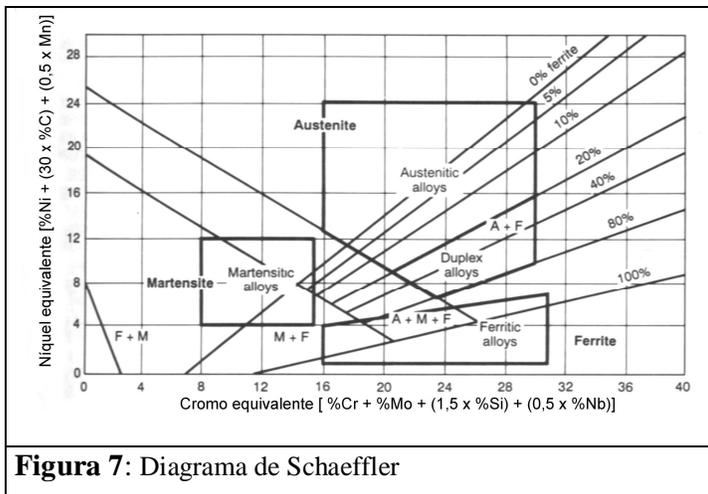


Figura 7: Diagrama de Schaeffler

El diagrama de Schaeffler que se muestra en la figura 7 es uno de los primeros que se ha desarrollado y permite relacionar la composición con los rangos de existencia de las aleaciones ferríticas, austeníticas, martensíticas y duplex.

Este diagrama ha sido conocido como la guía básica para el manejo de los aceros inoxidables. Sin embargo, hoy

existen otras versiones actualizadas que contemplan otras variables, tanto en lo relacionado con la composición como con el proceso de obtención.

Se considerarán ahora las características básicas de cada una de la familias desde el punto de vista metalúrgico pero haciendo énfasis sobre las propiedades a temperatura ambiente.

Aceros inoxidables martensíticos

Estos aceros son básicamente aleaciones de hierro, cromo y carbono que poseen una estructura tetragonal centrada en el cuerpo (bct) en la condición de templado (estructura martensítica). Son ferromagnéticos y endurecibles por tratamiento térmico y generalmente resistentes a la corrosión en medios moderadamente corrosivos. Su contenido de cromo en general se ubica entre 10.5 % y 18 % y el contenido de carbono puede exceder el 1.2 %. Los contenidos de cromo y carbono son balanceados para asegurar la estructura martensítica después del tratamiento. El acero puede contener también carburos en exceso de manera de incrementar la resistencia al desgaste o para favorecer la conservación de filos en aplicaciones de cuchillería. El agregado de elementos de aleación tales como niobio, silicio, tungsteno y vanadio modifican la respuesta del acero en el revenido. Además pequeñas cantidades de níquel pueden ser agregadas para mejorar la resistencia a la corrosión en ciertos medios y mejorar la tenacidad. El agregado de azufre o selenio mejora la maquinabilidad. La figura 8 muestra la relación entre varios grados estándar.

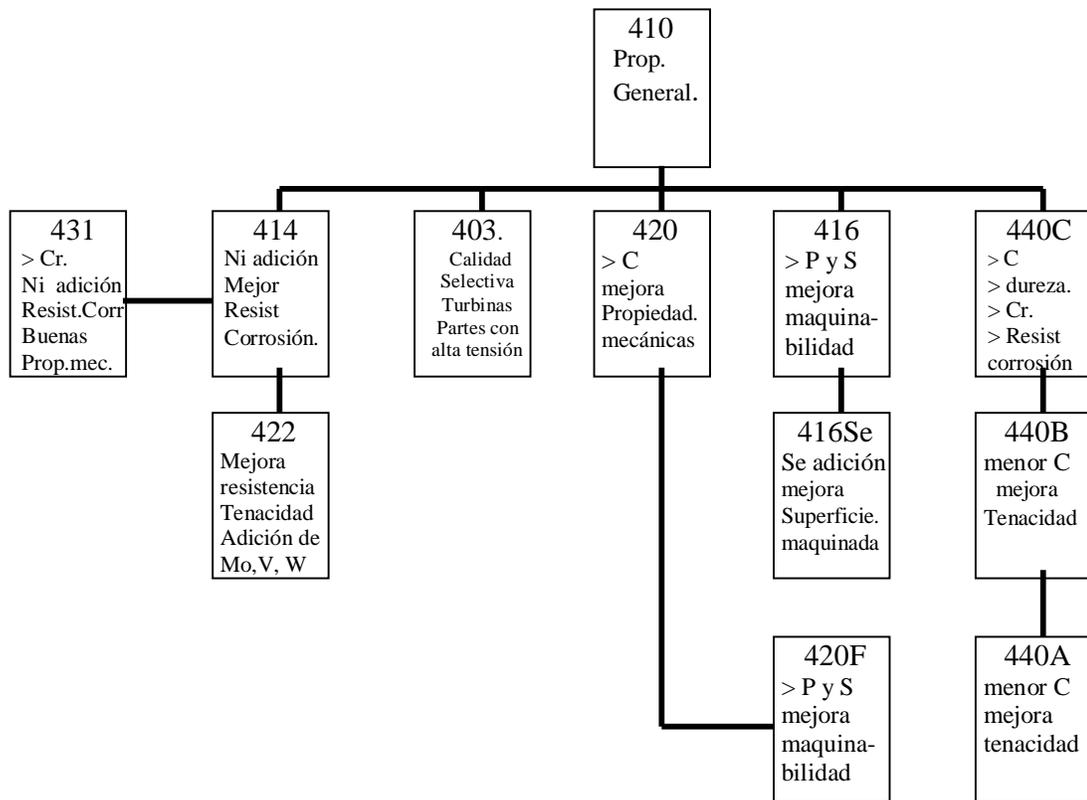


Figura 8: Relaciones entre grados de aceros de la familia de inoxidables martensíticos

Metalurgia básica de los inoxidables martensíticos

A altas temperaturas la microestructura de equilibrio de los aceros martensíticos es austenita. A temperatura ambiente la microestructura de equilibrio es una mezcla de ferrita y carburos. En el calentamiento la formación de austenita ocurre muy rápidamente, pero la transformación a ferrita en enfriamiento es extremadamente lenta. En consecuencia estos aceros tienen una alta tendencia a transformarse en martensita cuando se los enfría desde temperaturas en que la austenita es estable. De hecho es muy difícil evitar la formación de martensita en estas aleaciones. La martensita es posible formarla en piezas con secciones gruesas grandes aún enfriando en aire, donde el enfriamiento es muy lento.

El diagrama hierro-cromo que se muestra en la figura 9 indica que con contenidos de cromo mayores a aproximadamente 12 % la austenita no está presente a ninguna temperatura por lo que la aleación está constituida sólo por ferrita de manera que no puede ser endurecido por calentamiento y enfriamiento. Sin embargo la adición de carbono a las aleaciones hierro-cromo incrementa el rango en que la austenita está presente a altas temperaturas. También podría ser posible expandir el rango de austenita con la adición de níquel, nitrógeno, cobre y manganeso. En la figura 10 se aprecia la influencia del carbono en dos aleaciones que tienen respectivamente 13 y 17 % de cromo.

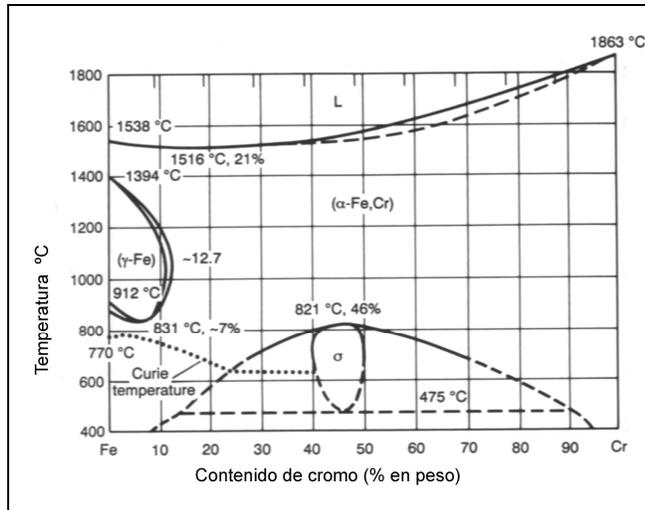


Figura 9: Diagrama hierro - cromo

Con 17 % de cromo se puede lograr una completa estructura austenítica cuando el carbono se ubica alrededor del 0.4 % a 1250 °C. En estas condiciones puede ser completamente endurecido. Cuando los aceros resistentes a la corrosión basados en cromo fueron descubiertos, resultaba muy dificultoso reducir el contenido de carbono por lo que los primeros aceros eran martensíticos.

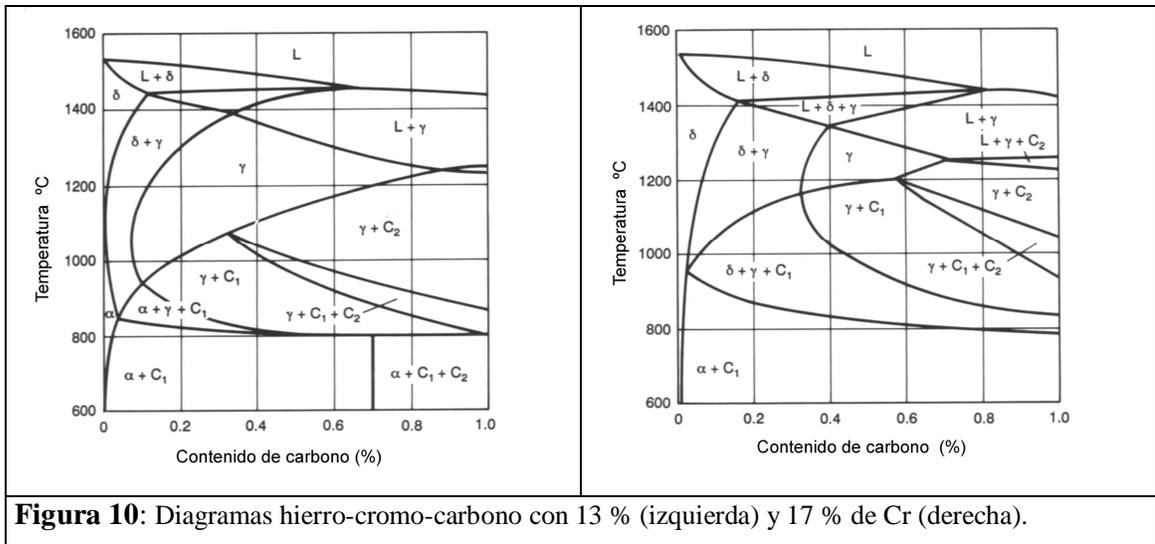


Figura 10: Diagramas hierro-cromo-carbono con 13 % (izquierda) y 17 % de Cr (derecha).

El contenido de carbono determina completamente la dureza de la martensita. En la figura 11 se puede observar, a través de datos experimentales, una relación entre el contenido de carbono y la dureza. Particularmente, se observa que con contenidos de carbono tan bajos como 0.10 % y con estructura martensítica se pueden obtener valores de dureza del orden de 35 HRC. La dureza de la martensita se incrementa a valores por encima de 60 HRC con aproximadamente 0.5 % de carbono y no cambia significativamente a niveles más altos de carbono. En la figura 11 se debe cumplir una condición esencial que toda la estructura debe ser martensítica. En aceros al carbono y de baja aleación un enfriamiento muy rápido es

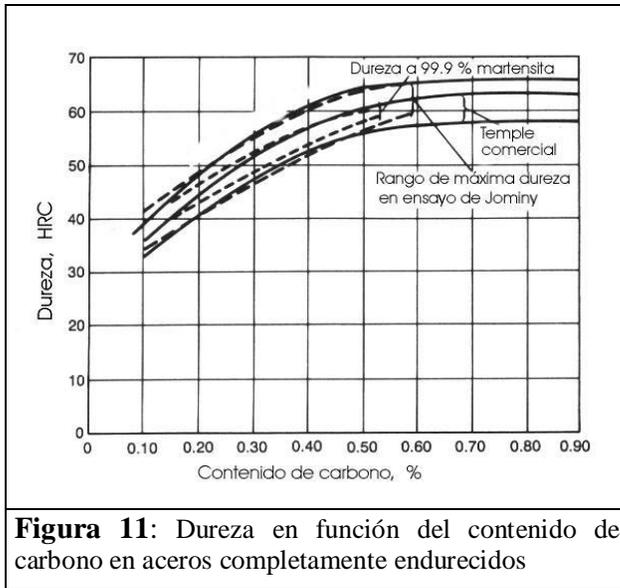


Figura 11: Dureza en función del contenido de carbono en aceros completamente endurecidos

necesario para evitar la formación de ferrita. Sin embargo, con el agregado de elementos de aleación esto resulta más fácil. Con niveles del 12 % de cromo se requieren muy bajas velocidades de enfriamiento para obtener 100 % de martensita.

En la figura 12 se observa un diagrama de transformación isotérmica para el acero prototipo de los martensíticos, el AISI 410 (UNS41000) que contiene aproximadamente 0.1 % de carbono y 12 % de cromo. En dicho diagrama se puede apreciar que este acero enfriado desde altas temperaturas y mantenido a 700 °C requerirá más de 2 minutos para que comience cualquier transformación ferrítica y muchas horas para completar

la transformación a ferrita y carburos. Mientras que enfriando y manteniendo la temperatura a 400 °C se requerirá más de 1 semana antes que la transformación ferrita comience.

La figura 12 muestra además que la transformación a martensita en el acero AISI 410 comienza cuando en el enfriamiento la temperatura alcanza aproximadamente unos 350 °C y termina cuando se llega a una temperatura de alrededor de 250 °C.

La adición de cromo u otros elementos de aleación no sólo redundará en un retardo de la transformación a ferrita sino que reduce la temperatura de inicio de la martensita. En casos extremos, como los aceros altamente aleados, algo de austenita podrá permanecer indefinidamente a temperatura ambiente lo cual obligará a un tratamiento por debajo de cero o tratamientos más complejos de revenido, por ejemplo doble tratamiento, para inducir la transformación completa de la austenita.

Propiedades y aplicaciones

Ya se ha visto que el más común de la familia de los martensíticos es el AISI 410 que contiene 12% de Cr y 0.1 % de C lo cual mejora la resistencia. Con un mayor nivel de carbono y consecuentemente con un incremento aun mayor de la resistencia están las aleaciones de la serie 420, 440A, 440B y 440C. En éstas 3 últimas en particular se ha incrementado el nivel de cromo para mantener la resistencia a la corrosión.

El molibdeno puede ser agregado para mejorar las propiedades mecánicas o resistencia a la corrosión como el caso del tipo 422. El níquel se adiciona por las mismas razones en los tipos 414 y 431. Cuando altos contenidos de cromo son necesarios para mejorar la resistencia a la corrosión, el níquel también sirve para poder alcanzar la estructura austenita y

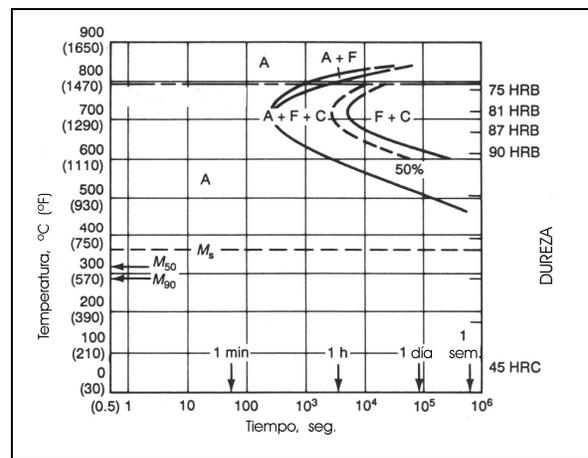


Figura 12: Transformación isotérmica del acero AISI 410.

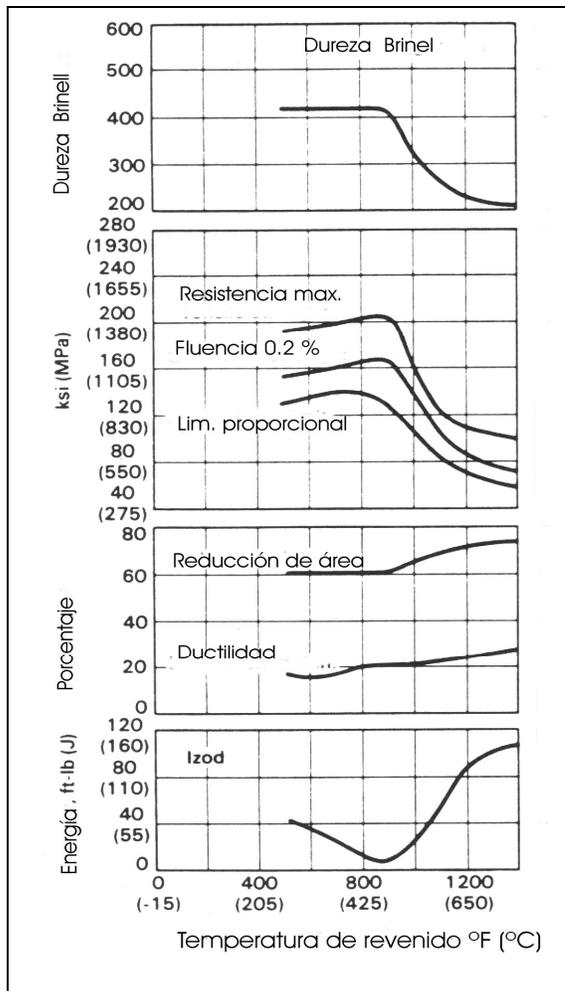


Figura 13: Influencia del revenido en las propiedades mecánicas austenizado a 925 °C por 30 minutos.

prevenir la formación de ferrita libre. Las limitaciones que presentan estas aleaciones respecto al contenido de cromo para mantener una estructura completamente martensítica, restringe su resistencia a la corrosión a niveles moderados.

En la condición de recocido los inoxidables martensíticos tienen una tensión de fluencia de aproximadamente 275 MPa y pueden ser endurecidos moderadamente por deformación en frío. Sin embargo, estas aleaciones son endurecidas por temple y luego revenidas para alcanzar resistencias de fluencia del orden de 1900 MPa, pero este valor depende del contenido de carbono. En general poseen buena ductilidad y tenacidad pero éstas disminuyen a medida que aumenta la resistencia. Dependiendo del tratamiento térmico la dureza puede pasar de 150 HB (80 HRB) en su condición de recocido a 600HB (58 HRC) cuando están completamente endurecidas.

Los aceros inoxidables martensíticos son especificados cuando la aplicación requiere buena resistencia a tracción, resistencia al creep, a la fatiga y al desgaste en combinación con una moderada resistencia a la corrosión y resistencia en caliente hasta aproximadamente 650 °C. En general, aleaciones de bajo y medio contenido de carbono (por ejemplo el grado 410 y las versiones modificadas) han sido usados en turbinas de vapor, motores de reacción y

turbinas de gas.

El tipo 420 y similares se han usado en cuchillería, partes de válvulas, engranajes, ejes y rodamientos. Una aplicación bastante extensa ha sido como recubrimientos soldados de rodillos para trenes de colada continua.

Los aceros martensíticos también son usados en equipos de la industria del petróleo y petroquímicas. Los que contienen alto carbono (grados 440) son empleados también en cuchillería, elementos de cirugía e instrumentos para trabajos dentales, tijeras, resortes, válvulas, engranajes, levas y rodamientos de bolas.

Fragilización por revenido

Una de las características importantes de los aceros martensíticos es la posibilidad de regular las propiedades mecánicas mediante tratamientos térmicos de revenido. En su condición de templado los aceros poseen su dureza alta, pero a su vez su tenacidad y ductilidad son bajas.

En la figura 13 se muestra como varían estas propiedades mediante la aplicación del revenido. En general la resistencia y dureza son mantenidas hasta temperaturas de aproximadamente

450 °C y luego caen rápidamente. Si se aplican temperaturas más altas de austenización previo al temple, se disuelve más cromo y por lo tanto el pico de dureza secundaria se torna más notorio. La fragilización por revenido se desarrolla en el rango de 425 a 565 °C como se muestra en la figura 13 en los resultados de ensayos de impacto Izod. El revenido debe ser evitado en este rango en aplicaciones que sean sensibles al impacto.

Aceros inoxidables ferríticos

Estos aceros son esencialmente aleaciones ferromagnéticas que contienen cromo con estructura cúbica centrada en el cuerpo (bcc). El contenido de cromo usualmente se ubica en el rango entre 10.5 a 30%. Algunos grados pueden contener además molibdeno, silicio, aluminio, titanio y niobio para obtener alguna característica especial. También azufre y selenio se suele agregar con el objetivo de mejorar la maquinabilidad. Pueden tener buena ductilidad y formabilidad pero su resistencia a altas temperaturas es pobre comparados con los austeníticos. En secciones gruesas, la tenacidad también es algo limitada particularmente a bajas temperaturas.

Metalurgia básica de los inoxidables ferríticos

En el diagrama de fases hierro – cromo, mostrado en la figura 9 la composición de los aceros ferríticos se ubica a la derecha de la zona de austenita. Debido a que el contenido de carbono de las aleaciones comerciales desplaza el borde del campo austenítico hacia contenidos de cromo más altos, la adición de elementos fuertemente formadores de ferrita, puede ser necesaria para prevenir la formación de austenita. Como se ha indicado anteriormente, la austenita presente a altas temperaturas se transforma con altísima probabilidad en martensita. El equilibrio de la composición para mantener la estructura ferrítica puede ser medido a través del índice de Kaltenäuser IK.

Ecuación 1

$$IK = [\%Cr + 6\%Si + 8\%Ti + 4\%Mo + 2\%Al] - [40(\%C + \%N) + 2\%Mn + 4\%Ni + 2\%Cu].$$

Cuando el índice de Kaltenäuser es mayor que 13 se puede asegurar que la estructura del acero será ferrítica debido a que la composición queda fuera de la zona austenítica.

Existen esencialmente 3 generaciones de aceros inoxidables ferríticos. En la primera generación (aproximadamente 1920) el contenido de carbono no era demasiado bajo debido a que los procesos de decarburación no eran muy eficientes. La aleación representativa de esta época es la AISI 430 con 0.12 % de C y 17 % de Cr. El diagrama de la figura 10 indica que esta aleación es completamente ferrítica por encima de 1250 °C. A temperaturas más bajas alrededor de los 1030 °C coexiste con austenita y por debajo de ésta aparecen los carburos. A temperatura ambiente solamente ferrita y carburos son las fases que se mantienen en condiciones de equilibrio. La aleación tipo 446 (0.2 % de C max; 25 % Cr) es también de la primera generación y tiene un comportamiento similar. En algunos casos las aleaciones de la primera generación son mal llamadas ferríticas porque siempre aparece algo de austenita. Esta austenita tiene algunos beneficios ya que retarda el crecimiento de grano el cual tiene un efecto importante en la fragilización de los aceros ferríticos. Sin embargo, la austenita tiende a transformarse en martensita. Este problema ocurre en la soldadura de los aceros de la primera generación que redundan en un cordón con puntos duros que obliga a realizar tratamientos térmicos posteriores a la soldadura.

Los aceros inoxidables ferríticos de segunda generación tienen contenidos de carbono y nitrógeno más bajos a lo cual es agregado un elemento estabilizador para atrapar cualquier C o N que esté presente. El prototipo del acero de segunda generación es el AISI 409 (0.04 % C, 11 % Cr, 0.5 % Ti). El Ti atrapa todo el carbono y nitrógeno disponibles lo cual deja libre

todo el cromo. El titanio remanente también actúa como elemento ferritizante por lo que la aleación es ferrítica a todas las temperaturas. La aleación tipo AISI 405 es similar pero estabilizada con Al el cual se combina con el nitrógeno pero no el carbono y este es también un potente ferritizante. Los carburos o nitruros generados por el agregado de estabilizadores son finos precipitados que ayudan a restringir el crecimiento de grano el cual causa la fragilización de los aceros ferríticos de segunda generación que son soldados.

La tercera generación de aceros ferríticos surgió alrededor de los años 70 con el advenimiento de técnicas de decarburación más eficientes en la fabricación de aceros. Los niveles de carbono y nitrógeno son típicamente de 0.02 % o menores y estabilizadores tales como Ti y Nb son agregados para combinar cualquier elemento intersticial libre. La aleación prototipo es la AISI 444 (18 % Cr, 2 % Mo). Además existen una serie de aleaciones no cubiertas por la clasificación denominadas superferríticos y muchos grados existentes han mejorado su composición con el empleo de estas técnicas.

La tercera generación de aceros ferríticos son libres de austenita a todas las temperaturas. Sin embargo, aun persisten otros inconvenientes asociados a los ferríticos como la fragilización por la formación de fases intermetálicas a temperaturas elevadas. En efecto, son sensibles a la fragilización a 475 °C que ocurre por la precipitación de una fase rica en cromo, α' la cual es una ferrita rica de alto cromo ($\cong 61$ %) que precipita a partir de la ferrita rica en hierro. También se pueden fragilizar por la formación de las fases σ , χ y otras fases a altas temperaturas. La fase σ que aparece en el diagrama Fe-Cr (figura 9) es una fase frágil a bajas temperaturas que se forma con aproximadamente 48 % de Cr. La fase χ es un complejo intermetálico de Fe-Cr-Mo que puede aparecer solamente en aceros conteniendo molibdeno.

En el caso de la fase α' la fragilización puede desaparecer por disolución de ésta a temperaturas superiores a 575 °C. Para las restantes fases, la temperaturas necesaria para disolverlas totalmente es demasiado alta y causa un severo crecimiento de grano en la ferrita. Debido a que este crecimiento causa fragilidad, estos tratamientos no son practicables. En general, un trabajado en caliente es necesario para reducir un tamaño de grano grueso y restaurar completamente la ductilidad y tenacidad de la aleaciones fragilizadas con σ , χ u otras compuestos intermetálicos de alta temperatura.

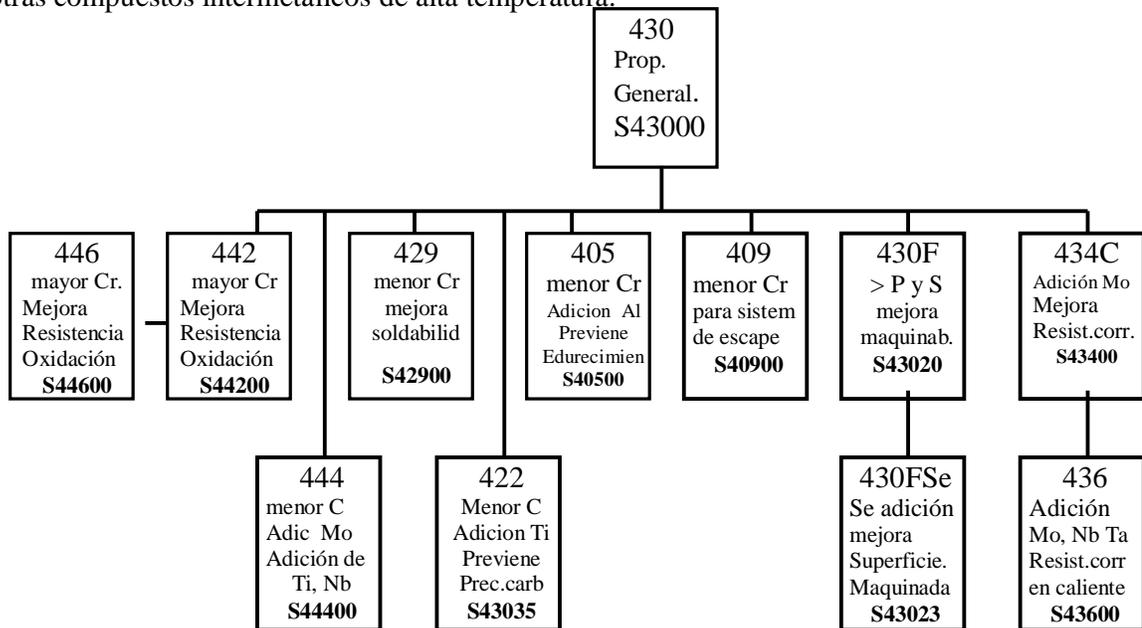


Figura 14: Relaciones entre grados de aceros de la familia de inoxidables ferríticos

Propiedades y aplicaciones

A diferencia de los martensíticos los aceros inoxidable ferríticos no pueden ser endurecidos por tratamiento térmico. Además, debido a que los índices de endurecimiento por deformación de la ferrita son relativamente bajos y a que el trabajado en frío reduce significativamente la ductilidad los aceros inoxidable ferríticos, este mecanismo no es frecuentemente usado para endurecerlos. En la figura 15 se comparan las características de endurecimiento por trabajado en frío de los ferríticos y austeníticos.

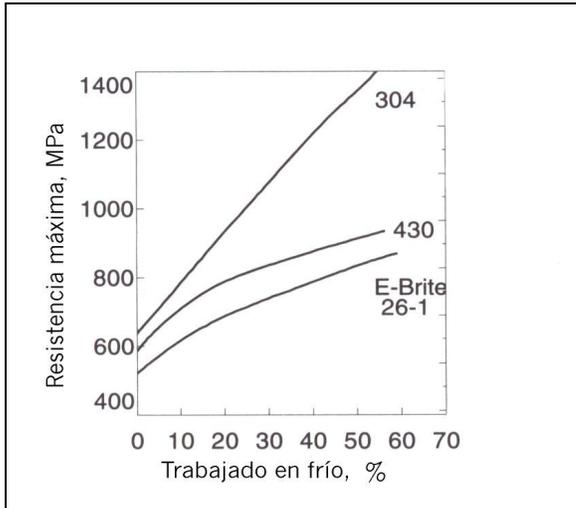


Figura 15: Efecto del trabajado en frío de aceros austeníticos y ferríticos.

El límite de fluencia y resistencia máxima de los ferríticos en la condición de recocido es de 240 a 380 MPa y 415 a 585 MPa respectivamente. La ductilidad se encuentra en el rango de 20 a 35 %.

Resistencias más altas se pueden obtener para aceros altamente aleados, por ejemplo los superferríticos con valores de 515 MPa para la fluencia y 655 MPa para la resistencia máxima.

Comparados relativamente con los martensíticos que poseen una moderada resistencia a la corrosión, los grados 405 y 409 se ubican en el mismo rango de resistencia. Medidos en la misma escala relativa, los grados 444 y UNS S44627,

S44635, S44660 y S44700 ofrecen una excelente resistencia a la corrosión.

Los tipos 405 y 409 poseen resistencia a la corrosión atmosférica. El tipo 430 es además resistente a la oxidación en ácidos moderados y ácidos orgánicos y por lo tanto se pueden usar con equipos para procesamiento de alimentos y en piletas de cocina. Los superferríticos ofrecen una resistencia excepcional a la corrosión localizada inducida por exposición a aguas cloradas. No son sensibles como los austeníticos a la corrosión localizada como el picado, corrosión en rendijas y corrosión bajo tensiones (SCC). Por lo tanto pueden ser aplicados en intercambiadores de calor y sistemas de cañerías que operen con agua de mar.

La fragilización a 475 °C y a la formación de fase σ , limitan la temperatura de operación, para largos tiempos de servicio, de muchos de los aceros ferríticos la que es usualmente de 250 °C como máximo. Sin embargo, la fragilización a 475 °C no significa un severo problema para los aceros de bajo cromo, por ejemplo los tipos 405 y 409, los cuales han sido usados extensamente en sistemas de escape para automóviles.

Otra excepción de limitación de máxima temperatura de servicio ocurre con el uso del grado 446 en placas de hornos de tratamiento térmico que trabajan con esfuerzos de compresión y que debido a su alto contenido de cromo ofrece una importante resistencia a la oxidación en aire a altas temperaturas. La fragilización que ocurre es crítica a temperatura ambiente pero no es importante para el tipo de esfuerzos a que está sometido. La caída de la tenacidad y ductilidad tampoco es relevante cuando se encuentra a altas temperaturas. El uso de este acero en bajas temperaturas con esfuerzos dinámicos de tracción no es recomendado.

Los aceros inoxidable ferríticos generalmente requieren un rápido enfriamiento desde la temperatura de trabajado en caliente para evitar el crecimiento de granos y la fragilización por formación de la fase α' . En base a esto muchos ferríticos son usados en espesores

relativamente finos, especialmente en aleaciones de alto cromo. Los aceros superferríticos son limitados a placas finas, hojas y tubos.

La Ductilidad y Tenacidad de los inoxidables ferríticos son afectadas por muchos factores. La resistencia y habilidad de la estructura bcc para sostener la deformación plástica son muy dependientes temperatura, especialmente por debajo de la ambiente. La resistencia se incrementa rápidamente y la ductilidad cae bruscamente con el descenso de la temperatura, aparentemente esto se debe a que las dislocaciones de hélice pierden su habilidad para el deslizamiento cruzado en la estructura bcc. Como resultado los aceros

ferríticos experimentan una transición de una fractura dúctil caracterizada por coalescencia de microcavidades a una fractura frágil caracterizada por clivaje. La temperatura a la cual esta transición ocurre se le llama temperatura de transición dúctil frágil (DBTT) (Ductile - Brittle Transition Temperature) y la fractura de clivaje puede ser iniciada por fisuras intergranulares o fisuras inducidas por deformación en partículas de segunda fase. En la figura 16 se muestra una representación esquemática del significado de la temperatura de transición, la cual se puede determinar a través de ensayos de impacto. En contraste con los ferríticos los aceros austeníticos no presentan esta temperatura de transición y mantienen buena ductilidad y tenacidad por debajo de la temperatura ambiente. En inoxidables ferríticos la temperatura DBTT también depende de espesor de la sección y se puede ubicar por encima de la temperatura ambiente. La figura 17 muestra la DBTT como una función de el espesor de la sección para algunos de los inoxidables ferríticos.

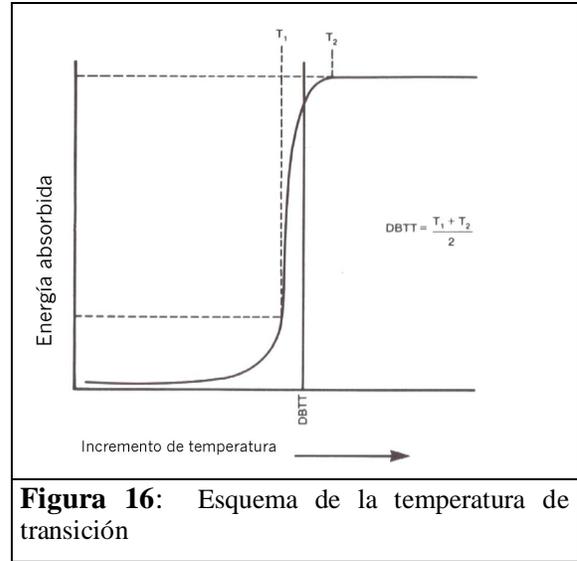


Figura 16: Esquema de la temperatura de transición

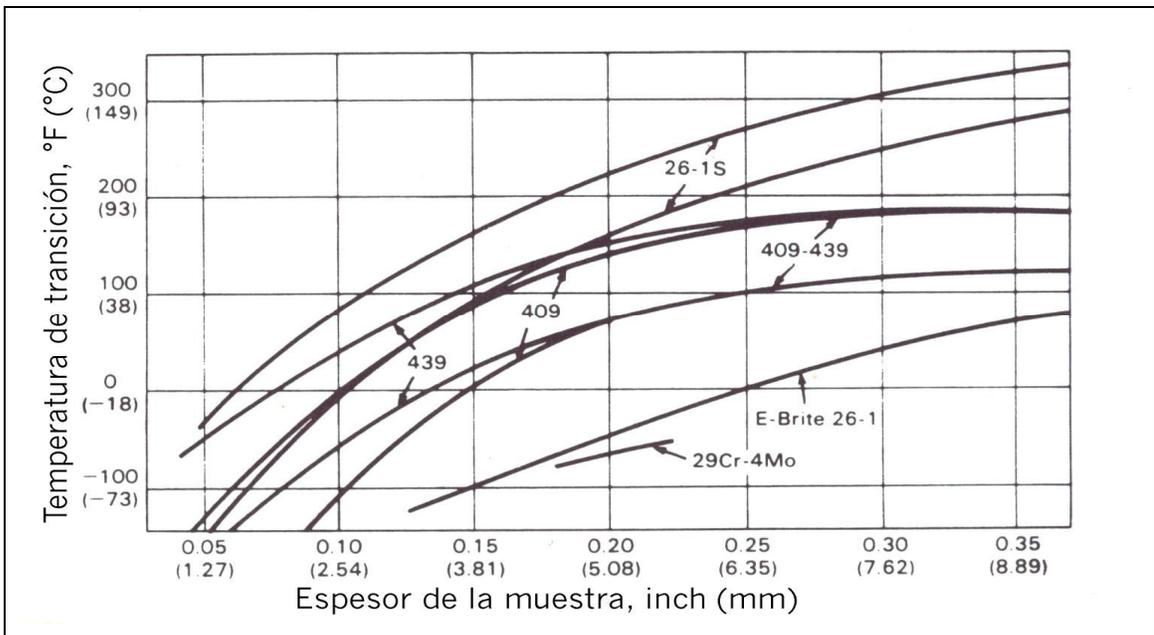


Figura 17: Temperatura de transición en función del espesor de la sección de varios ferríticos

Las secciones más gruesas ofrecen una mayor restricción al flujo plástico y como consecuencia de ello ocurre la fractura frágil, incluso muy por encima de la temperatura ambiente a medida que la sección se incrementa.

En contraste las secciones finas las cuales pueden fluir a través del espesor se mantienen dúctiles y altamente conformables bien por debajo de la temperatura ambiente.

Otros factores que influyen la DBTT en los inoxidables ferríticos son el tamaño de grano, contenido de intersticiales tales como carbono y nitrógeno y la presencia de varias tipos de segundas fases. Así, un tamaño de grano fino, bajo contenido de elementos intersticiales y la eliminación de segundas fases por un apropiado tratamiento térmico son mecanismos útiles para incrementar la ductilidad y tenacidad. Las mejoras implementadas en los procesos de fusión que incluyen la decarburación con argón y oxígeno (proceso AOD) y fusión al vacío, junto con la estabilización a través de elementos tales como el titanio y niobio han sido extremadamente importantes para obtener bajos contenidos de C+N.

Aceros inoxidables austeníticos

Los aceros inoxidables austeníticos tienen una estructura cúbica centrada en las caras. Esta estructura es alcanzada a través del uso de elementos austenizantes tales como el níquel, el manganeso, y nitrógeno. Son esencialmente no magnéticos en su condición de recocido y pueden ser endurecidos solamente por trabajado en frío. Estos aceros usualmente poseen excelentes propiedades criogénicas y buena resistencia a altas temperaturas. Su contenido de cromo varía generalmente desde 16 a 26 %, los contenidos de níquel hasta aproximadamente el 35 % y manganeso hasta el 15 %. La serie 200 contiene nitrógeno, de 4 a 15.5 % de Mn y hasta 7 % de Ni. Los aceros de la serie 300 contienen mayores cantidades de Ni y son agregados hasta 2 % de Mn, Mo, Cu, Si, Al, Ti o Nb para conferir ciertas propiedades tales como resistencia al picado y a la oxidación. Azufre o selenio también se agregan en algunos grados para mejorar la maquinabilidad. La figura 19 muestra la relación entre los distintos grados de aceros austeníticos.

Metalurgia básica

Los aceros inoxidables austeníticos están basados en el balance entre los elementos que promueven la formación de ferrita y aquellos que tienden a estabilizar la austenita.

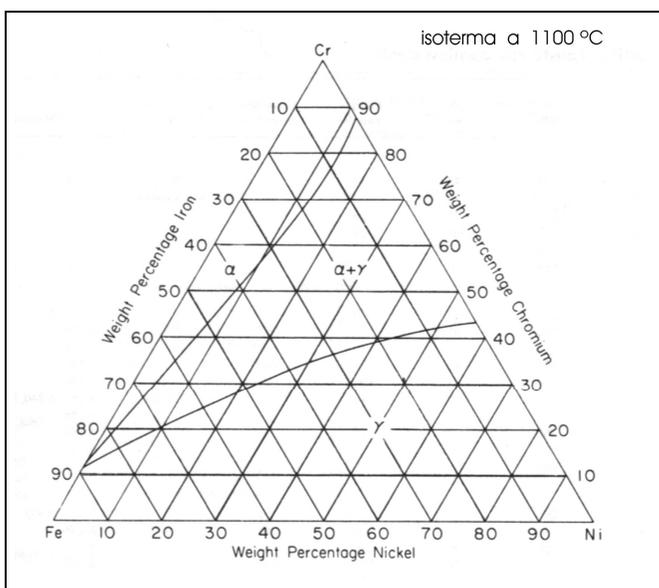


Figura 18: Diagrama ternario Fe-Cr-Ni a 1100 °C

Los aceros inoxidables austeníticos son mejor descritos en un diagrama de equilibrio ternario de Fe-Cr-Ni. Los restantes elementos pueden alterar el balance de fases, pero la estructura en general es determinada por estos tres elementos básicos. La figura 18 muestra el diagrama de equilibrio ternario Fe-Cr-Ni a 1100 °C que es la temperatura de máxima estabilidad de la austenita y por tal es usada para el recocido óptimo de los aceros 18-8.

El elemento “ferritizante” típico es el Cr, en el diagrama se aprecia la presencia de la fase α en la zona de mayor contenido de cromo. No obstante el Mo, Ti, Nb, Al, W y V

también promueven la formación de ferrita. En el diagrama también se observa que el típico elemento que promueve la austenita (fase γ) es el Ni, aunque también elementos tales como C, N y Cu promueven la transformación de ferrita en austenita a altas temperaturas. El manganeso no promueve la transformación a altas temperaturas, pero tiende a estabilizar la austenita con respecto a la transformación a martensita a bajas temperaturas. Además, el Mn promueve la solubilidad del nitrógeno en el acero haciendo posible la familia de aceros austeníticos de bajo níquel, los cuales son de alto contenido de Mn y N.

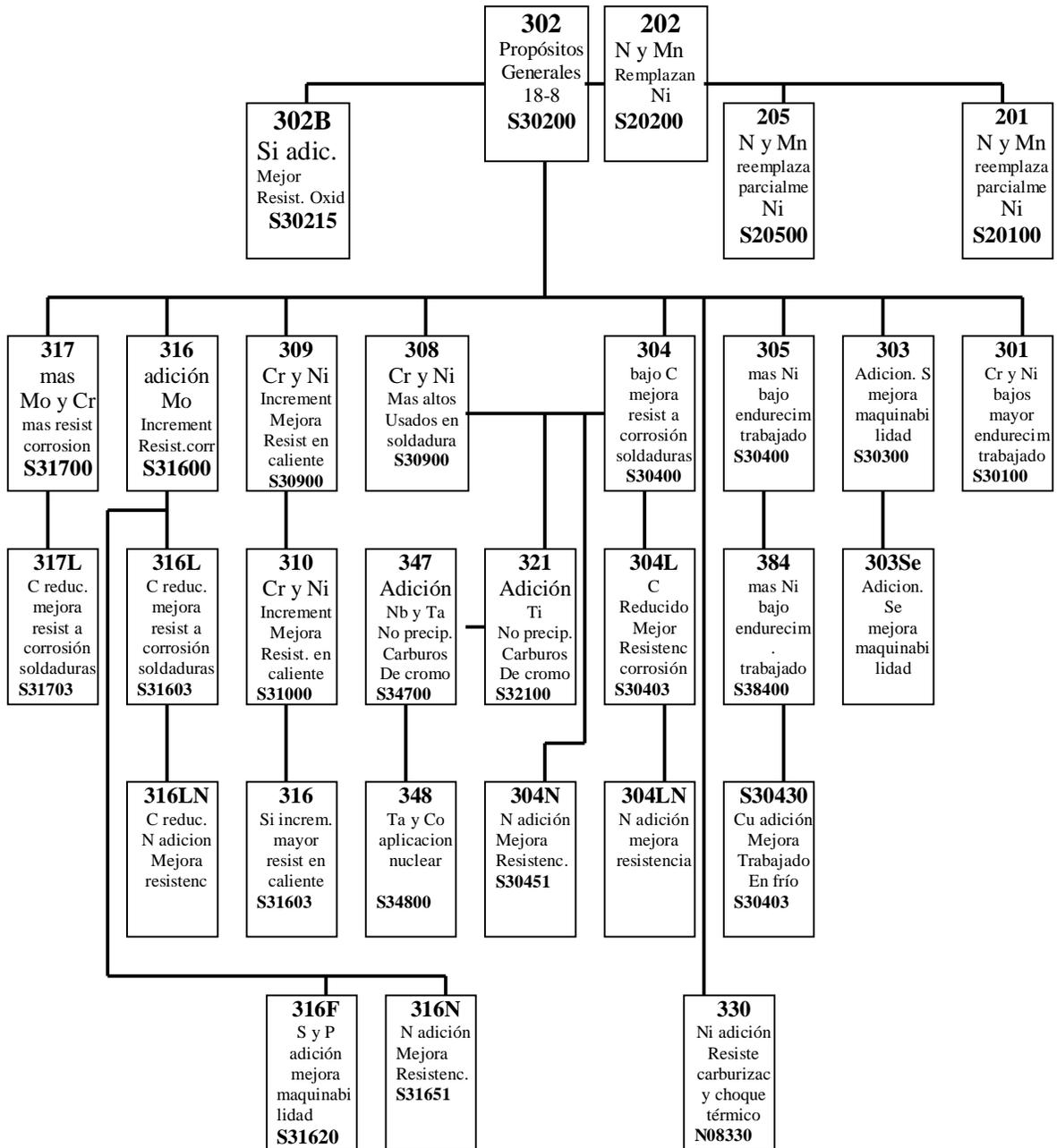


Figura 19: Relaciones entre grados de aceros de la familia de inoxidable austeníticos

Cuando se compara el diagrama ternario con el diagrama binario Fe-Cr (figura 9) se puede ver que la adición de níquel extiende el campo de la austenita. En el diagrama de la figura 18 el

acero 18-8 cae en la zona de hierro gamma muy próximo a la zona duplex ($\alpha+\gamma$) del diagrama. En realidad, por encima de 1150 °C algo de ferrita δ se formará. El diagrama también indica que si se adiciona cromo por encima del 18 % es necesario aumentar el contenido de níquel o se incrementará la cantidad de ferrita presente.

Además de extender el campo de existencia de la austenita el níquel también baja la temperatura Ms (ecuación 2) al enfriar desde temperaturas de recocido. De hecho todos los elementos de aleación encontrados en estos aceros bajan la temperatura Ms incluyendo el Cr y el Mo los cuales a altas temperaturas promueven la formación de ferrita.

Precipitación de carburos y corrosión intergranular

La sensibilización o precipitación de carburos puede ocurrir cuando los aceros austeníticos son calentados en el rango de 425 °C a 870 °C. Este rango es aproximado y depende de la composición particularmente del contenido de carbono.

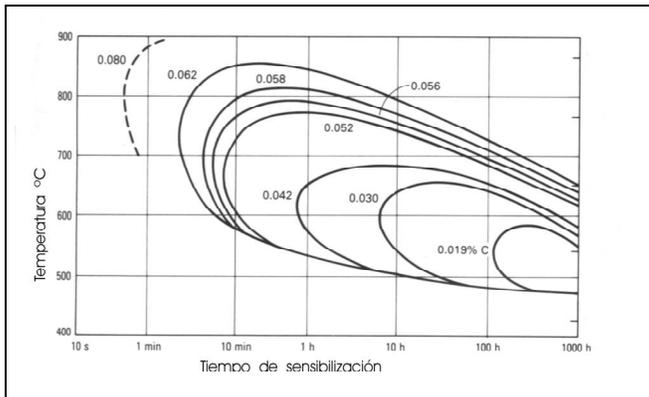


Figura 20: Precipitación de carburos en función del tiempo y la temperatura.

El tiempo y la temperatura determinarán la cantidad de carburos precipitados. Cuando los carburos precipitan en los borde de grano, el área inmediatamente adyacente pierde cromo en forma considerable. El tipo de carburo formado en los aceros austeníticos convencionales es $(Cr,Fe)_{23}C_6$ o $M_{23}C_6$. El contenido de Cr del carburo es muy alto pudiendo alcanzar hasta un 94 % (si alcanza la forma $Cr_{23}C_6$).

Cuando la precipitación alcanza cierta continuidad a lo largo del borde de grano la pérdida de cromo torna al acero susceptible a la corrosión intergranular, por lo cual ocurre la disolución de la zona de bajo cromo en los alrededores de los bordes. La sensibilización también resulta en un detrimento de la resistencia a otras formas de corrosión como el picado, corrosión por rendijas y SCC.

Curvas de tiempo-temperatura-sensibilización están disponibles y a través de ellas se dispone de una guía para evitar la ocurrencia del fenómeno las cuales ilustran además el efecto del carbono. Un ejemplo de éstas se aprecia en la figura 20. Las curvas muestran que en un acero tipo 304 con 0.062 % C se debe enfriar por debajo de los 595 °C dentro de los 5 minutos, pero para un 304L con 0.03 % C se puede demorar hasta aproximadamente 20 horas para enfriar por debajo de 480 °C sin que la sensibilización ocurra. Estas curvas son en general guías y deben ser verificadas antes de aplicar a varios tipos de acero. En la figura 21 se

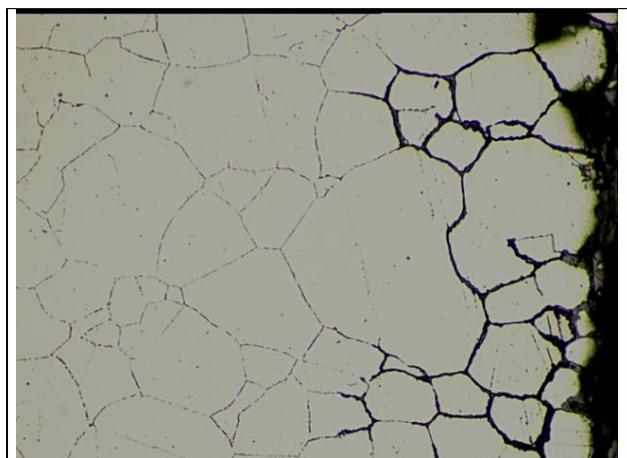


Figura 21: Carburos precipitados en bordes de grano (izq) y corrosión intergranular (der)

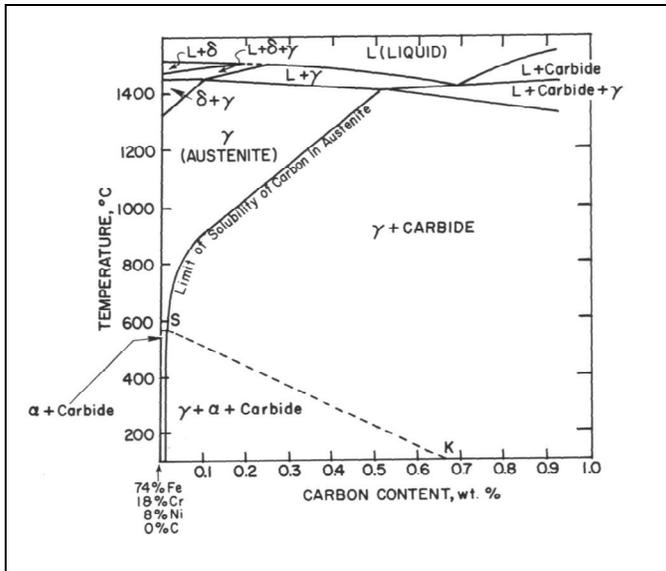


Figura 22: Corte del diagrama de equilibrio para el acero 18Cr-8Ni

aprecia la microestructura de un acero sensibilizado (austenita y carburos en bordes de grano) y un avance de corrosión intergranular debido a la sensibilización desde la derecha (austenita y productos de corrosión en los bordes de grano).

La idea de limitar el contenido de carbono para evitar la precipitación está ligada al límite de solubilidad de éste en austenita. En la figura 22 se muestra un diagrama de equilibrio para un acero austenítico (18 Cr-8 Ni) donde se aprecia que edicho límite es muy bajo. Si bien con enfriamiento rápido se tiene una muy baja probabilidad de ocurrencia de la precipitación, al elevar la temperatura al rango

referido ésta ocurre porque las fases estables son austenita y carburos. Por encima de 800 °C el límite de solubilidad comienza a aumentar considerablemente.

Otro método para evitar la sensibilización es el uso de aceros estabilizados. Estos aceros contienen titanio y/o niobio, que son elementos que tienen mayor afinidad por el carbono. Estos elementos forman carburos más rápidamente que el cromo con lo cual éste se mantiene en solución aun cuando los aceros son expuestos a temperaturas en el rango de sensibilización por tiempos extremadamente largos. Los grados más comunes de aceros estabilizados son el AISI 321 y AISI 347. El 321 contiene un mínimo de titanio de 5 veces el contenido de carbono y nitrógeno ($Ti \% = 5x(C+N) \%$), mientras que el 347 contiene un mínimo de niobio de 8 veces el contenido de carbono ($Nb \% = 8x C \%$). El nitrógeno debe ser considerado cuando se usa titanio porque el nitruro de titanio es muy estable. Así el titanio que se combina con el nitrógeno no estará disponible para formar carburos con el carbono, por lo tanto, se debe considerar también esta reacción para calcular la cantidad total necesaria de titanio.

El grado AISI 304L evita la sensibilización en tiempos relativamente cortos, por ejemplo cuando es soldado, pero puede sensibilizarse a través de largas exposiciones. La figura 23 muestra 4 grados aceros austeníticos (304, 304L, 321 y 347) soldados juntos y luego atacados con ácidos $HNO_3 + HF$. El grado 304 presenta un ataque localizado de relevancia en la zona afectada térmicamente (ZAT) debido a la precipitación de carburos (franja paralela al cordón de soldadura). Los restantes no presentan signos del ataque. El ataque ocurre en la ZAT porque es la zona que se encuentra en el rango de precipitación durante el proceso de soldadura.

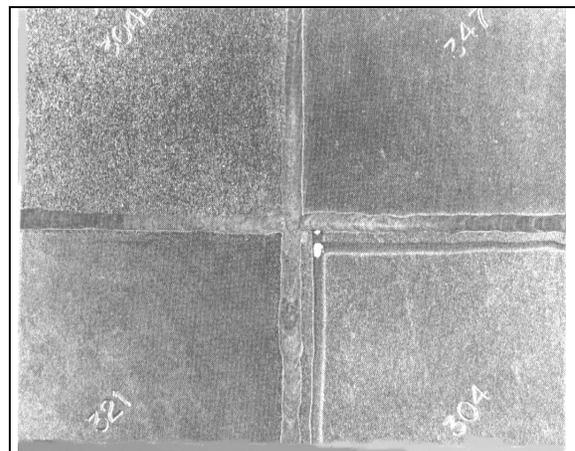


Figura 23: Efecto de la soldadura en 4 aceros austeníticos atacados con HNO_3+HF

El tratamiento de solubilización es recomendado para eliminar el problema de

sensibilización. Mediante este tratamiento se busca disolver nuevamente los carburos en la matriz de austenita. Para ello es necesario calentar el acero por encima de 1050 °C y luego enfriarlo rápidamente. No obstante, la temperatura máxima depende del tipo de acero.

Los aceros estabilizados particularmente con Ti, presentan a veces un tipo de ataque llamado Knife-line attack (KLA). Este ocurre en soldaduras, en el borde de la zona de fusión donde la temperatura es tal (mayor a 1230°C), que se alcanza la disolución de los TiC. Debido a que el enfriamiento es muy rápido éstos no pueden precipitar nuevamente por lo que el carbono queda disponible nuevamente. Si el acero es calentado lentamente o se aplica un nuevo cordón de soldadura, por encima de 550 °C (dependiendo de la velocidad calentamiento) se comienzan a dar condiciones de precipitación del $M_{23}C_6$. Los TiC precipitan recién por encima de 850 °C por lo que la precipitación del $M_{23}C_6$ es de muy alta probabilidad antes de la precipitación de TiC. Esto trae como consecuencia un ataque intergranular que ocurre en la zona contigua a la fundida y que tiene forma de filo de cuchillo.

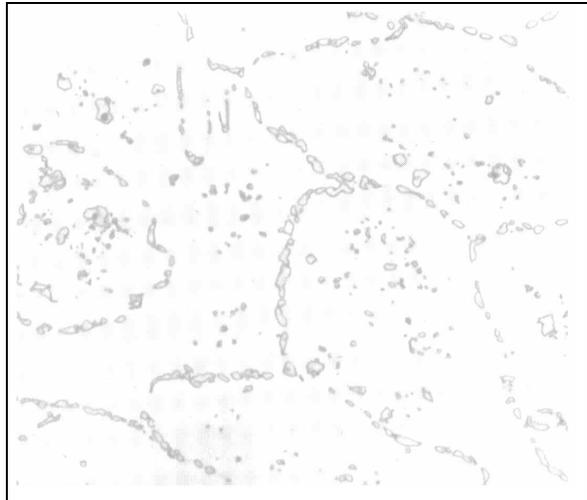


Figura 24: Fase sigma en austenita

Si el acero es calentado lentamente o se aplica un nuevo cordón de soldadura, por encima de 550 °C (dependiendo de la velocidad calentamiento) se comienzan a dar condiciones de precipitación del $M_{23}C_6$. Los TiC precipitan recién por encima de 850 °C por lo que la precipitación del $M_{23}C_6$ es de muy alta probabilidad antes de la precipitación de TiC. Esto trae como consecuencia un ataque intergranular que ocurre en la zona contigua a la fundida y que tiene forma de filo de cuchillo.

Precipitación de fases intermetálicas

La precipitación de fase σ (sigma) y de otras fases intermetálicas también incrementa la susceptibilidad a la corrosión y a la fragilización.

La fase σ es una fase rica en cromo y molibdeno que tiende a tornar susceptible el acero inoxidable a la corrosión intergranular, picado y rendijas. Este mecanismo es más frecuente en aceros de alto cromo y alto molibdeno. Su precipitación ocurre cuando el acero es sometido a altas temperaturas en el rango de 540 a 900 °C, durante períodos generalmente prolongados, aunque este rango varía con la composición y el proceso. La cinética de formación presenta una curva tipo C similar a la de precipitación de carburos, ubicándose el tiempo más corto para su formación en el rango de 700 a 810 °C (nariz de la curva), es decir, en este rango es donde se produce la mayor cantidad de formación en el tiempo más corto. En la figura 24 se aprecia el aspecto de la microestructura de un acero austenítico expuesto 27 meses a 760 °C.

La fase σ en aleaciones Fe - Cr tiene una estructura tetragonal, con una relación c/a de aproximadamente 0.52, cuya celda elemental contiene 30 átomos. Su composición, como se aprecia en el diagrama Fe-Cr (figura 9) corresponde a un 46 % de cromo y a temperatura ambiente es nomagnética. Su dureza es de aproximadamente 68 HRC y posee una alta fragilidad la que es más acentuada a temperatura ambiente y se manifiesta a través de una importante caída de la resistencia al impacto.

En general, los elementos estabilizadores de la ferrita tienden a acelerar la formación de la fase σ , mientras que los estabilizadores de la austenita ejercen el efecto contrario. En aceros austeno-ferríticos la formación ocurre más rápidamente a partir de la ferrita que de la austenita. Un tamaño de grano grueso generado en recocidos de solución a altas temperaturas retarda la formación de fase σ . La influencia del trabajado en frío depende de la cantidad de trabajado y su efecto sobre la recristalización. Si la cantidad de trabajado en frío es suficiente para producir recristalización, en el rango de trabajo la formación de fase σ , ésta se

incrementa. Si no ocurre recristalización la velocidad de formación podría no ser afectada y aún pequeñas cantidades de deformación que no promueven recristalización pueden retardar la formación.

Formación de martensita

La martensita se puede formar en aceros austeníticos durante el enfriamiento por debajo de la temperatura ambiente o como consecuencia del trabajado en frío. Eichelman y Hull han desarrollado una ecuación para predecir la temperatura M_s en aceros inoxidables austeníticos.

Ecuación 2

$$M_s(^{\circ}F) = 75(14.6-Cr) + 110(8.9-Ni) + 60(1.33-Mn) + 50(0.47-Si) + 3000(0.068-(C+N))$$

Esta ecuación muestra que los elementos de aleación sustitucionales como el Cr, Ni, Si y Mn tienen un efecto moderado sobre la temperatura M_s , comparados con la fuerte influencia de los elementos intersticiales C y N. El contenido de nitrógeno residual en los aceros austeníticos se ubica usualmente entre 300 y 700ppm (0.03 y 0.07 %). Este combinado con carbono tiene un fuerte efecto en la estabilización de la austenita retardando la formación de martensita. Cuando se forman carburos $M_{23}C_6$ en bordes de grano de la austenita, el carbono y el cromo son retirados de las zonas adyacentes y por tanto la temperatura M_s aumenta y puede ser alcanzada localmente en la austenita de la zona de bordes de grano por lo que la martensita podría formarse. Este fenómeno de hecho es aprovechado para desarrollar una estructura martensítica en aceros de endurecimiento por precipitación.

Dos tipos de martensita se forman espontáneamente en el enfriamiento de los aceros austeníticos debajo de la temperatura ambiente: Martensita ϵ de estructura hcp y α' de estructura bcc. La martensita ϵ se forma sobre los planos más compactos (111) en la austenita y con excepción del tamaño es de morfología similar a las maclas de deformación o fallas de apilamiento que también se forman sobre los planos (111).



Figura 25: Formación de martensita en acero austenítico deformado

La martensita α' se forma como placas con planos de habito (225) en grupos unidos por láminas de austenita sobre planos (111). La nucleación de martensita α' y su relación con la martensita ϵ ha sido muy dificultoso de resolver. Existen evidencias de formación de α' directamente de austenita o con ϵ como fase intermedia.

La martensita inducida por deformación es otra característica única que presentan los aceros austeníticos. Esta martensita se forma a más alta temperatura que las otras ya analizadas y el parámetro M_d , que representa la más alta temperatura a la cual se puede formar una designada cantidad de martensita bajo una condición definida de deformación, es usado para caracterizar la estabilidad de la austenita relativa a la deformación. Angel publicó la siguiente relación de M_d con la composición de los aceros inoxidables austeníticos.

Ecuación 3

$$M_{d30} (\text{°C}) = 413 - 462(\text{C+N}) - 9.2(\text{Si}) - 8.1(\text{Mn}) - 13.7(\text{Cr}) - 9.5(\text{Ni}) - 18.5(\text{Mo})$$

Donde M_{d30} es la temperatura a la cual se forma la martensita para un 30 % de deformación verdadera. Otra vez el carbono y el nitrógeno tienen la más fuerte influencia sobre la estabilidad de la austenita. Los aceros de carbono extra bajo (grado AISI 304L), son considerablemente sensibles a la formación de martensita y esta característica los torna susceptibles a reducir su rendimiento en altas presiones de hidrógeno (las estructuras centradas en el cuerpo presentan una muy alta susceptibilidad a la fragilización inducida por hidrógeno). Sin embargo, la martensita inducida por deformación incrementa significativamente la resistencia generada por trabajado en frío. Los grados de inoxidables AISI 301 y AISI 304 están diseñados para tener bajos contenidos de cromo y níquel a los efectos de explotar este mecanismo de endurecimiento. La efectividad de esta metodología es demostrada en la comparación de las curvas tensión deformación para los aceros inoxidables grados 301 y 304 la cual es mostrada en la figura 26. En las gráficas se aprecia el campo de deformación plástica para ambos aceros,

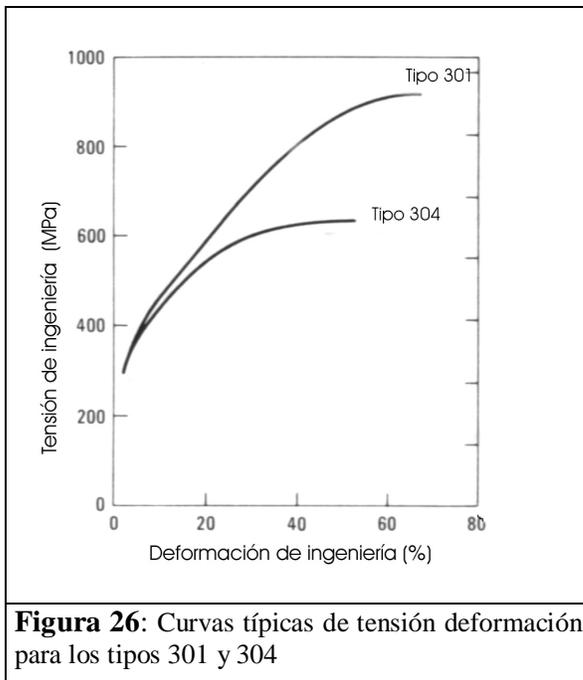


Figura 26: Curvas típicas de tensión deformación para los tipos 301 y 304

de deformación plástica para ambos aceros, donde el endurecimiento que ocurre en el grado 301 es notoriamente mayor que en el grado 304. Esto implica una resistencia máxima notoriamente mayor.

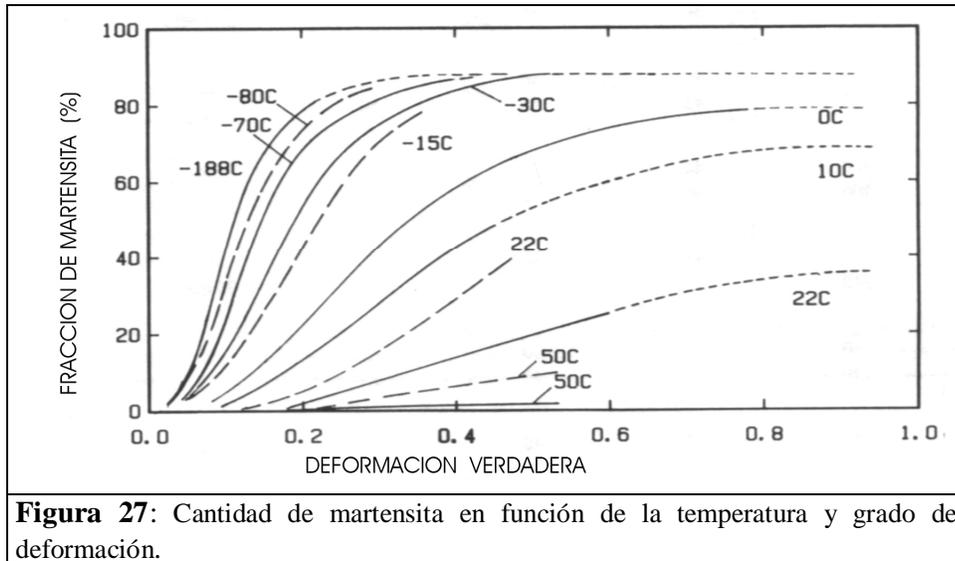
La extensión de la transformación inducida por deformación de austenita a martensita, es dependiente de la relación de la temperatura de deformación y de la deformación además de la composición. En la figura 27 se aprecia el efecto de la temperatura y deformación sobre la cantidad de martensita inducida por deformación en el grado 304. Grandes cantidades de martensita se forman cuando la deformación ocurre a baja temperatura. La cantidad de martensita es prácticamente ilegible por encima de la temperatura ambiente.

Propiedades y aplicaciones de los inoxidables austeníticos

Aceros de la serie 300. La resistencia de fluencia de los aceros inoxidables austeníticos es más bien baja y es sólo comparable con aquellos aceros de resistencia moderada. Las propiedades mecánicas típicas de los aceros recocidos son : Fluencia 205 a 275 MPa, la resistencia máxima de 520 a 760 MPa y la elongación de 40 a 60 %. Los aceros austeníticos no pueden ser endurecidos por tratamiento térmico, pero endurecen rápidamente por trabajado. Por lo tanto es posible alcanzar altas resistencias en la forma de trabajado en frío, especialmente en alambres trefilados en que la resistencia que se alcanza es de 1200 MPa o mayor. El calor de la soldadura ablandará la zona afectada térmicamente en aceros altamente deformados en frío.

Aún los más débiles aceros austeníticos (tales como los 302 y 304, los cuales pueden ser considerados las aleaciones bases de los aceros austeníticos) ofrecen resistencia a la corrosión en general en la atmósfera, en muchos medios acuosos, en presencia de alimentos y en ácidos

oxidantes tales como el ácido nítrico. Los tipo 321 y 347 son aleaciones con adiciones de titanio o niobio respectivamente, con la composición básica del tipo 304 los cuales estabilizan los carburos para combatir la sensibilización.



La adición de molibdeno en los tipos 316 y 316L mejora la resistencia al picado en ácidos fosfórico y acético y en soluciones de cloro diluido así como también buena resistencia en ácido sulfúrico (H_2SO_3). Los tipo 317 y 317L tienen un más alto contenido de molibdeno (3%) el cual provee una mejor resistencia al picado.

El nitrógeno es agregado para mejorar la resistencia a temperatura ambiente y especialmente a temperatura criogénicas como ocurre por ejemplo en el grado 304LN. El nitrógeno también es agregado para reducir la velocidad de la precipitación de carburos de cromo y por lo tanto la susceptibilidad a la sensibilización. También se agrega nitrógeno, a las aleaciones que contienen molibdeno para incrementar la resistencia al picado inducida por cloruros y la resistencia a la corrosión por rendijas.

Altas cantidades de cromo y níquel son agregados a algunas aleaciones para incrementar la resistencia a la oxidación a altas temperaturas, como en los grados 309, 310 y 330. Así mismo, cobre y níquel pueden ser agregados a aleaciones austeníticas para mejorar la resistencia a los ácidos reductores tales como el ácido sulfúrico. El níquel y el molibdeno cuando están presentes en cantidades suficientes promueven una mejor resistencia a SCC (corrosión bajo tensiones) en medios con cloruros.

Aceros Duplex

Los aceros inoxidable duplex tienen una mezcla de estructura de ferrita (bcc) y austenita (fcc). La cantidad exacta de cada fase es una función de la composición y de la historia térmica de la aleación. Muchas de estas aleaciones son diseñadas para contener iguales cantidades de cada una de las fases en la condición de recocido. Los principales elementos de aleación son cromo y níquel, pero nitrógeno, molibdeno, cobre, silicio y tungsteno, pueden ser agregados para controlar el balance y proveer ciertas características de resistencia a la corrosión.

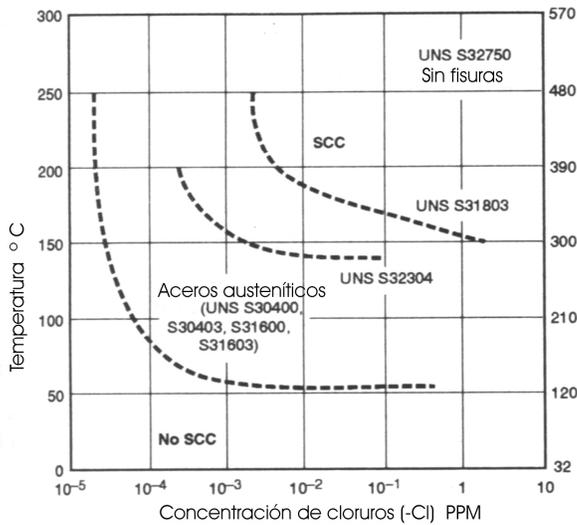


Figura 28: Resistencia a SCC de aceros austeníticos y duplex.

La resistencia a la corrosión de los aceros duplex es similar a la de los aceros inoxidable austeníticos con contenidos de aleación similar. Sin embargo, los aceros duplex poseen mayor fluencia y resistencia máxima y mejoran la resistencia a la SCC y al picado en medios conteniendo cloro con respecto a los aceros austeníticos. La tenacidad de los aceros duplex se encuentra entre la de los ferríticos y los austeníticos.

En la tabla 2 se presenta una selección de aceros inoxidable duplex procesados con su composición química y un parámetro cuyo valor indica la resistencia equivalente al picado PRE (pitting resistance equivalent).

Tabla 2: Composición química de una selección de aceros duplex.

Número UNS	Composición (%) (a)										
	C	Mn	S	P	Si	Cr	Ni	Mo	N	Otros	PRE
S31200	0.03	2.0	0.03	0.045	1.0	24.0 26.0	5.5 6.5	1.2 2.0	0.14 0.20	-	30.2 35.8
S31260	0.03	1.0	0.03	0.03	0.75	24.0 26.0	5.5 7.5	2.5 3.5	0.10 0.30	W0.1-0.5 Cu0.2-0.8	33.9 42.4
S31500	0.03	1.2 2.0	0.03	0.03	1.4 2.0	18.0 19.0	4.25 5.25	2.5 3.0	0.05 0.10	-	27.1 30.5
S31803	0.03	2.0	0.02	0.03	1.0	21.0 23.0	4.5 6.5	2.5 3.5	0.08 0.2	-	30.5 37.8
S32304	0.03	2.5	0.04	0.04	1.0	21.5 24.5	3.0 5.5	0.05 0.60	0.05 0.20	Cu0.05- 0.60	22.5 29.7
S32550	0.03	1.5	0.03	0.04	1.0	24.0 27.0	4.5 6.5	2.9 3.9	0.10 0.25	Cu1.5-2.5	35.2 43.9
S32750	0.03	1.2	0.02	0.035	1.0	24.0 26.0	6.0 8.0	3.0 5.0	0.24 0.32	Cu0.5	37.7 47.6
S32760	0.03	1.0	0.01	0.03	1.0	24.0 26.0	6.0 8.0	3.0 4.0	0.30	Cu0.5-1.0 W0.5-1.0	40 (c)
S32900	0.06	1.0	0.03	0.04	0.75	23.0 28.0	2.5 5.0	1.0 2.0		-	26.3 34.6
S32950	0.03	2.0	0.01	0.035	0.6	26.0 29.0	3.5 5.2	1.0 2.5	0.15 0.35		

(a) valor simple es un máximo; (b) PRE = %Cr + 3.3 %Mo + 16%N; (c) valor mínimo;

El valor PRE es calculado en base a los elementos que afectan a la resistencia al picado, Cr, Mo y N, afectados cada uno por un coeficiente el cual es relativo a la influencia que tiene cada elemento. En la tabla 2 se incluye la expresión de PRE de uso más común, aunque existen otras expresiones para el cálculo del PRE. Con esta expresión los valores de PRE van desde 24, correspondiente a aceros sin Mo, hasta 40 que son los que poseen mayor valor. Un mínimo valor de PRE de 40 es frecuentemente usado para definir los grados super duplex.

En cuanto a la resistencia a la SCC en la figura 28 se puede apreciar la resistencia comparativa de una selección de aceros austeníticos y duplex. Las líneas punteadas representan el límite de resistencia en función de la temperatura y la concentración de cloruros para los grados indicados. Por debajo de cada curva no ocurre el fenómeno de SCC, por encima el material indicado es susceptible. Se puede apreciar además que el grado UNS S32750 es totalmente inmune a la SCC.

El uso de los aceros Duplex está destinado a un rango intermedio de temperaturas (-60 a 300 °C) donde se requiere resistencia a los ácidos y cloruros en solución acuosa.

Los aceros Duplex comerciales pueden ser divididos en 4 grupos genéricos. Estos, listados en orden creciente de resistencia a la corrosión son los siguientes:

Fe-23Cr-4Ni-0.1N

Fe-22Cr-5.5Ni-3Mo-0.15N

Fe-25Cr-5Ni-2.5Mo-0.17N-Cu

Fe-25Cr-7Ni-3.5Mo-0.25N-W-Cu.

Metalurgia básica

Los aceros inoxidable Duplex de estructura ferrítico-austenítica solidifican como ferrita en un 100%. A altas temperaturas, aproximadamente 1300 °C, la austenita nuclea y crece primero en el borde de grano ferrítico y luego a lo largo de direcciones cristalográficas preferidas dentro del grano ferrítico. En la figura 30 se aprecia la microestructura de un acero inoxidable Duplex fundido.

A medida que ocurre la transformación de ferrita a austenita debe ocurrir difusión de elementos de aleación. Los elementos estabilizadores de la austenita (C, Ni, N y Cu) concentrándose en la austenita y los elementos estabilizadores de la ferrita (Cr, Mo y W) concentrándose en la ferrita. Así la extensión de la transformación, no sólo depende del balance entre los elementos estabilizadores de la ferrita y los de austenita en la aleación, sino también del tiempo disponible para la difusión de cada elemento específico. Es posible templar la aleación desde una temperatura próxima a la solidificación y obtener prácticamente el 100 % de ferrita a temperatura ambiente. Enfriamientos lentos, recocidos y trabajados en caliente promueven la transformación de ferrita a austenita a través de la activación de la difusión. En los aceros inoxidable Duplex el balance óptimo de fases es usualmente cantidades aproximadamente iguales cantidades de ferrita y austenita. Sus composiciones son usualmente ajustadas para obtener este balance de fases en equilibrio de estructuras a aproximadamente 1040 °C, después de trabajado en caliente y/o recocido.

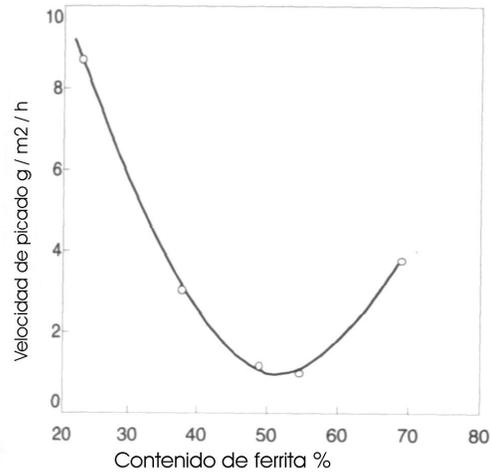


Figura 29: Contenido de ferrita en relación con la resistencia al picado

De los elementos de aleación que afectan el balance de fases el carbono es el más indeseable ya que afecta la resistencia a la corrosión (precipitación de carburos). Todos los restantes elementos con excepción del nitrógeno son elementos de aleación sustitucionales y por lo tanto lentos para difundir. Estos elementos contribuyen en la determinación del equilibrio en el balance de fases global, pero el nitrógeno es más importante en cuanto a la facilidad de alcanzar un balance de fases próximo al equilibrio.

Cuando los primeros aceros Duplex fueron desarrollados el nitrógeno no era un elemento de aleación agregado deliberadamente como tal. A raíz de esto la primera generación de estas aleaciones tenía bajas propiedades mecánicas y más pobre resistencia a la corrosión comparados con los más recientes desarrollos.

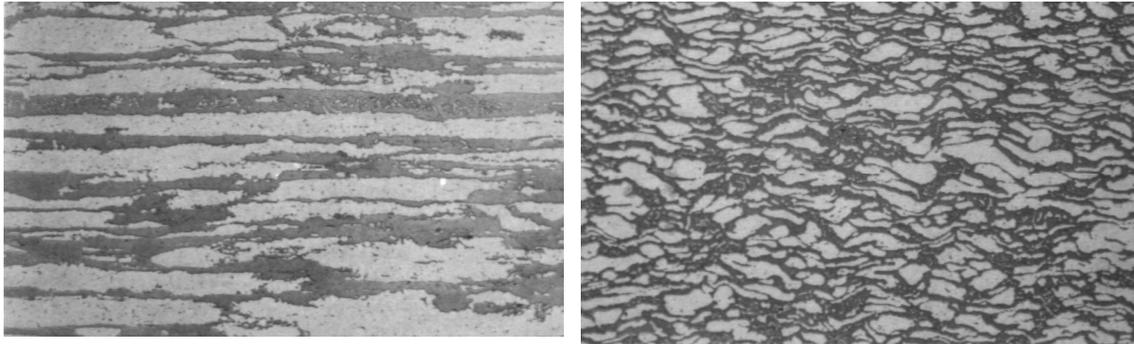


Figura 31: Microestructura de un acero Duplex laminado Fe-22Cr-5.5Ni-3Mo-0.15N longitudinal y transversal respectivamente.

Microestructura

Como se ha mencionado los aceros Duplex en condiciones óptimas, tienen aproximadamente iguales proporciones de austenita y ferrita siendo esta última el elemento matriz. En la figura

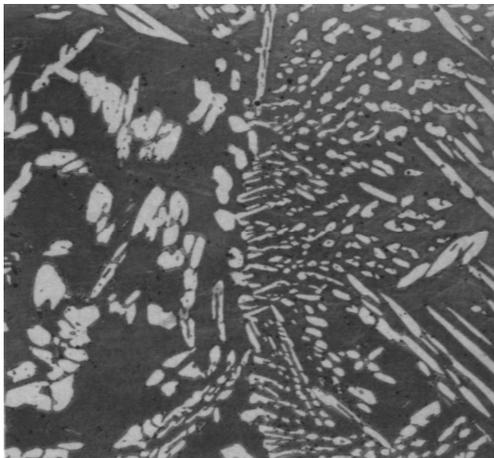


Figura 30: Microestructura duplex fundido Fe-22Cr-5.5Ni-3Mo-0.15N.

30 se observa una microestructura de un acero fundido, mientras que en la figura 31 se observa la microestructura en distintas orientaciones de un acero procesado por laminación. En ambos casos se muestra la matriz de ferrita con islas de austenita de diversas formas, no obstante, la microestructura fundida es más grosera y presenta diferentes formas para la austenita que no se observan en el acero procesado.

Propiedades y aplicaciones

Las ventajas específicas ofrecidas por los aceros duplex sobre los convencionales austeníticos de la serie 300 son su resistencia de fluencia (alrededor al doble respecto de los austeníticos), resistencia al SCC en cloruros y resistencia al picado. En general son usados en el rango de -60°C a 300°C . En la figura 32 se observa la

microestructura de una aleación con austeno-ferrítica la cual ha sufrido un mecanismo de ataque de SCC. Se puede apreciar que la ferrita actúa como freno a la propagación de fisuras que sólo se desarrollan a través de la austenita.

Los aceros procesados fueron desarrollados por los años 70 y a partir de los 80 se produjo un avance que fue mucho más rápido en el conocimiento de éstos, aunque muchos de los aceros originales estuvieron disponibles por muchas décadas. Modificaciones continuas a la composición de las aleaciones se han hecho para mejorar la resistencia a la corrosión, trabajabilidad y soldabilidad. En particular el agregado de nitrógeno ha sido efectivo para mejorar la resistencia al picado y la soldabilidad.

Propiedades mecánicas

La alta resistencia de fluencia de los aceros inoxidables duplex ofrece a los diseñadores un material capaz de soportar mayores esfuerzos y de esa manera se puede reducir el peso de los componentes y también por la misma causa, los tiempos de procesamiento para las mismas aplicaciones de carga. El acero Fe-22Cr-5.5Ni-3Mo-0.15N tiene una resistencia de fluencia de 450 MPa la cual es el doble que la de un acero austenítico y significativamente más alta que la de un ferrítico. En la tabla 3 se indican propiedades mecánicas de una selección de aceros duplex

Tabla 3: Propiedades mecánicas de una selección de aceros duplex

Número UNS	Resistencia fluencia, min (MPa)	Resistencia máxima, min. (MPa)	Elongación (%)	Dureza	
				HB	HRC
S31200	450	690	25	280	-
S31500	440	630	30	290	30.5
S31803	450	620	25	290	30.5
S32304	400	600	25	290	30.5
S32550	550	760	15	297	31.5
S32750	550	800	15	310	32
S32760	550	750	25	200-270	-
S32900	485	620	20	271	28
S32950	480	690	20	290	30.5

La tenacidad de los aceros duplex es buena y decae bastante próximo a los -100°C presentando una temperatura de transición bastante baja. Cuando el material es soldado la zona de aporte y la zona afectada térmicamente tienen mucho menor tenacidad lo cual constituye una de las mayores limitaciones de estos aceros. En la figura 33 se aprecian curvas de tenacidad en función de la temperatura para el metal de base y metal de aporte con dos procesos de soldadura diferentes y uno de ellos con dos tipos de aporte diferentes. El proceso GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) es un arco con electrodo de tungsteno en gas inerte con aporte externo y el proceso SMAW (Shielding

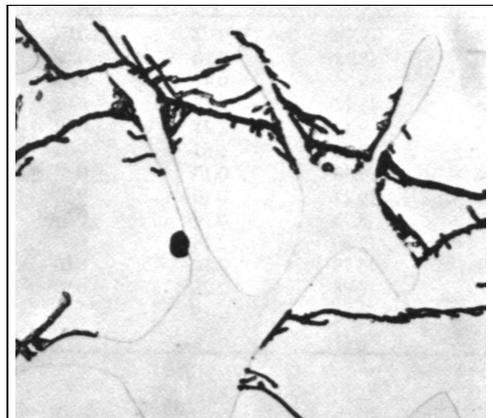


Figura 32: SCC a través de austenita.

Metal Arc Welding) es un arco con electrodo consumible.

El material de base presenta un cambio de la tenacidad con la temperatura más ligero que los de estructura bcc. Por esta razón estas aleaciones no son admisibles para aplicaciones criogénicas.

Debido a su alta resistencia de fluencia, en los aceros duplex la deformación en frío resulta más dificultosa que para los aceros austeníticos. Por lo tanto como el material deberá ser sometido a varios procesos en caliente serán necesario cuidados especiales para evitar que ocurran los mecanismos de fragilización a altas temperaturas.

El alto contenido de aleantes y la presencia de ferrita en la matriz, tornan a los aceros duplex susceptibles a la fragilización y a la pérdida de propiedades mecánicas particularmente tenacidad, a través de la exposición a elevadas temperaturas.

Esto es causado por la precipitación de fases intermetálicas, principalmente fase σ , fase χ y fase η (fase de Laves). Por esta razón, la temperatura máxima es limitada a aproximadamente 280 °C para materiales no soldados y a 250 °C para estructura soldadas. Los más altamente aleados son más susceptibles a la formación de estas fases perjudiciales. La figura 34 muestra las fases que pueden ser formadas, con el rango de temperaturas aproximado sobre el cual se desarrollan y el efecto de los elementos de aleación sobre la posición de las curvas tipo C que caracterizan los procesos de nucleación y crecimiento controlados por difusión.

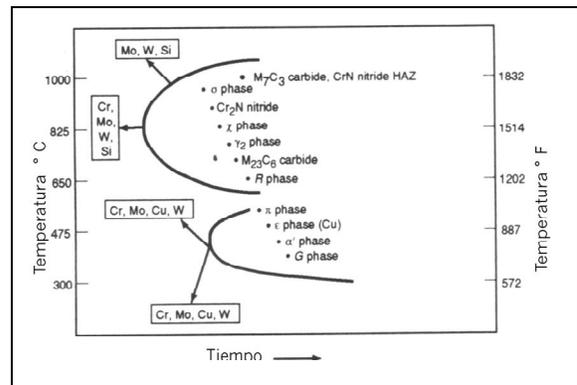


Figura 34: Efecto de los elementos de aleación en la precipitación de fases.

Aplicaciones

Los aceros duplex son usados en un extendido rango de industrias particularmente relacionadas con petróleo y gas, petroquímicas, pulpa de papel y control de la polución. Son usados comúnmente en soluciones acuosas, en medios conteniendo cloruros y fundamentalmente reemplazando a los aceros inoxidable austeníticos que han sufrido algún ataque por los mecanismos de SCC y picado. Las aleaciones de más alto contenido de elementos de aleación (llamados super duplex) son resistentes al agua de mar oxigenada o con cloro. Las aleaciones más pobres en elementos de aleación no son resistentes al contacto directo con agua de mar y pueden sufrir picado. Muchos tipos se han usado para el transporte de líquidos conteniendo gas CO₂, donde el acero al carbono sufre corrosión generalizada.

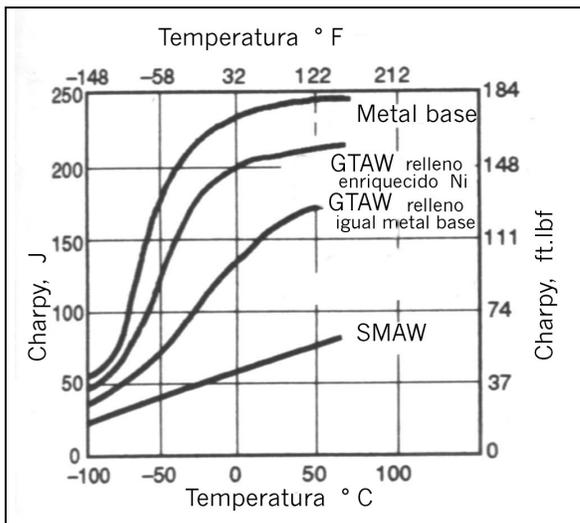


Figura 33: Tenacidad del Acero UNS 31803 soldado con distintos procedimientos.

La siguiente es una selección de aplicaciones típicas: los tipos S31803,

S32760, S32750 y S32550 en tubos para intercambiadores de refinерías, industria química y otras industrias que usan agua para sistemas de enfriamiento, digestores para industria del papel.

Todos los tipos son usados en intercambiadores, recipientes para reactores químicos, filtros de fuel gas, sistemas de manipuleo de ácido acético y fosfórico y equipamiento para la industria del petróleo y gas.

El S 32304 en calentadores de agua domésticos donde la resistencia al picado no es de gran importancia.

Aceros inoxidables de endurecimiento por precipitación

Los aceros inoxidables de endurecimiento por precipitación (PH) son aleaciones de cromo y níquel que contienen elementos de endurecimiento por precipitación tales como cobre, aluminio, o titanio. Estos aceros en su condición de recocidos, pueden ser algunos de los aceros austeníticos y martensíticos. Los aceros austeníticos en su condición de recocido son transformables a martensita a través de tratamientos térmicos, que en general requieren temperaturas por debajo de cero. En muchos casos estos aceros inoxidables pueden alcanzar altas resistencias mediante el mecanismo de endurecimiento por precipitación manteniendo su estructura martensítica. Los aceros PH pueden ser tipo martensíticos, austeníticos y semiausteníticos. En la tabla 4 se muestran los principales elementos de aleación de los aceros PH.

Metalurgia básica

Los aceros inoxidables PH son aleaciones de Fe-Cr-Ni caracterizadas por su alta resistencia obtenida a partir del endurecimiento por precipitación en la matriz martensítica o austenítica. Los elementos aleación que favorecen el mecanismo de endurecimiento por precipitación pueden ser uno o más de los siguientes: cobre, aluminio, titanio, niobio o molibdeno. La clasificación en martensíticos, austeníticos o semiausteníticos está basada en las temperaturas de comienzo y fin de la transformación martensítica (M_s y M_f) resultante del enfriamiento después del tratamiento de solución.

Un acero 9martensítico, como el 17-4PH tiene una temperatura M_f apenas por encima de la temperatura ambiente de manera que la transformación ocurre completamente a martensita después del enfriamiento en aire desde la temperatura de solución. Debido a esto y por tratarse de un acero de alta aleación éste es martensítico aún en la condición de recocido. El endurecimiento es alcanzado por un tratamiento de envejecimiento de 1 a 4 horas en el rango de 480 a 620 C.

El acero 17-7PH tiene una composición balanceada de modo que la temperatura M_s está ubicada bastante por debajo de la temperatura ambiente. Por lo tanto, estos son predominantemente austeníticos después del tratamiento de solución y enfriamiento. En esta condición tienen alta ductilidad por lo cual pueden ser conformados con cierta facilidad. Después de conformados la transformación a martensita es completada por un tratamiento de acondicionamiento en el cual se alteran sus temperaturas M_s y M_f por precipitación de carbono y elementos de aleación de la solución sólida. Este tratamiento de acondicionamiento es la clave de la transformación y el resultado depende de la temperatura a la que se realice. A bajas temperaturas, 730 a 760 °C, la precipitación es tal que la temperatura M_f se aproxima a la temperatura ambiente y por lo tanto la transformación a martensita es total en el enfriamiento. Si el tratamiento de acondicionamiento se realiza a altas temperaturas, 930 a 955 °C, menor cantidad de carbono es precipitado y la temperatura M_f se ubica por debajo de cero por lo que se requieren tratamientos sub-cero para completar la transformación a martensita. Sin embargo, la martensita producida de esta última manera es de más alto

carbono y por lo tanto se alcanza una mayor resistencia que la producida con tratamientos de acondicionamiento a más bajas temperaturas. La transformación también puede ser completada por trabajado en frío. En todos los casos la estructura martensítica es endurecida luego por envejecimiento en el rango de 455 a 565 °C en tiempos de 1 a 3 horas.

Tabla 4: Selección de aceros PH típicos clasificados por la microestructura

Aleación	Número UNS	Composición (%)						
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Otros
Tipos martensíticos								
PH13-8Mo	S13800	0.05	0.10	0.10	12.25 13.25	7.5-8.5	2.0-2.5	0.90-1.35Al 0.01N
15-5PH	S15500	0.07	1.00	1.00	14.0 15.5	3.5-5.5	-	2.5-4.5Cu 0.15-0.45Nb
17-4PH	S17400	0.07	1.00	1.00	15.0 17.5	3.0-5.0	-	3.0-5.0Cu 0.15-0.45Nb
Custom 450	S45000	0.05	1.00	1.00	14.0 16.0	5.0-7.0	0.5-1.0	1.25-1.75Cu 8x%CminNb
Custom 455	S45500	0.05	0.50	0.50	11.0 12.5	7.5-9.5	0.50	1.5-2.5Cu 0.8-1.4Ti 0.1-0.5Nb
Tipos semiausteníticos								
PH15-7Mo	S15700	0.09	1.00	1.00	14.0 16.0	6.50-7.75	2.0-3.0	0.75-1.50Al
17-7PH	S17700	0.09	1.00	1.00	16.0 18.0	6.50-7.75	-	0.75-1.50Al
AM-350	S35000	0.07-0.11	0.50-1.25	0.50	16.0 17.0	4.0-5.0	2.50-3.25	0.07-0.13N
AM-355	S35500	0.10-0.15	0.50-1.25	0.50	15.0 16.0	4.0-5.0	2.50-3.25	0.07-0.13N
Tipo austeníticos								
A-286	S66286	0.08	2.00	1.00	13.5 16.0	24.0 27.0	1.0-1.5	1.90-2.35Ti 0.35maxAl 0.10-0.50V 0.003-0.01B
JBK-75	-	0.015	0.05	0.02	14.5	29.5	1.25	2.15Ti;0.25Al 0.27V;0.0015B

Un acero austenítico como el A-286 tiene una temperatura Ms tan baja que no puede ser transformado a martensita. El aumento de la resistencia es obtenido por precipitación de compuestos intermetálicos en la matriz de austenita. No se realizará una descripción del tratamiento de envejecimiento de los aceros PH, los cuales fueron estudiados para aleaciones de aluminio. Se detallan a continuación los precipitados que ocurren en los distintos aceros:

Martensíticos

PH13-8Mo: NiAl coherente + finas partículas de γ
 15-5PH : fase rica en Cu cúbica centrada en las caras.
 17-4PH : fase rica en Cu cúbica centrada en las caras.
 Custom 450 : Fase de Laves conteniendo Fe, Nb y Mo.

Custom 455 : Ni₃Ti fase coherente ordenada hcp

Semiausteníticos

17-7PH : Fase bcc ordenada.

PH15-7Mo : β -NiAl + Ni₃Al

AM-350 : Cr₂N

AM-355 : Cr₂N

Austeníticos

A-286 : Ni₃(Al,Ti)

JBK : Ni₃(Al,Ti)

Ciertas características son comunes para muchos aceros inoxidable PH. Para los martensíticos y semiausteníticos la máxima resistencia es obtenida por envejecimiento en el rango de 455 a 510°C. Altas temperaturas incrementan la ductilidad y tenacidad pero reducen el nivel de resistencia máxima que se alcanza y el tiempo requerido para alcanzarlo. Curvas típicas de envejecimiento para una selección de aceros martensíticos y semiausteníticos a 480 °C y 520 °C se muestran en la figura 35.

Para cualquier aleación se puede obtener un amplio rango de propiedades variando el tratamiento térmico. Sin embargo, los tratamientos térmicos estándar son generalmente los más usados para los cuales las propiedades mecánicas que se obtienen están disponibles en los manuales dedicados a estas aleaciones.

Los tiempos de envejecimiento estándares para las temperaturas de 480 °C y 520 °C son tales que muchos aceros así tratados alcanzan una condición en que son completamente envejecido o sobre-envejecidos en la cual se obtiene la mejor combinación entre resistencia y ductilidad. El acero PH15-7Mo es un caso inusual en que tiene la mejor combinación de resistencia y ductilidad con un ligero envejecido por defecto, esto es, un menor tiempo de tratamiento. Los envejecidos a temperaturas por encima de 510 °C, lo cual implica una condición de significativo sobre-envejecido se usan para requerimientos de mayor ductilidad y tenacidad.

La precipitación en los aceros austeníticos es marcadamente menor que en los martensíticos y semiausteníticos. Por ejemplo en el acero A-286 se requieren 16 horas a 720 °C para producir un endurecimiento próximo al máximo.

Propiedades y aplicaciones

Los aceros PH tienen una resistencia de fluencia en el rango de 515 a 1415 MPa y resistencias máximas desde 860 a 1520 MPa y ductilidades desde 1 a 25 %. Debido a su alta resistencia estas aleaciones son usadas en aplicaciones aeroespaciales y otras industrias de alta tecnología.

El prototipo de acero martensítico es el 17-4PH (17Cr-4Ni-3Cu), en su condición de recocido de solución (martensita) la fluencia es alrededor de 750 MPa. La fase de endurecimiento por precipitación es a base de cobre la cual después del envejecimiento a 480 °C es tan fina que sólo puede ser detectada con un microscopio electrónico de alta potencia. Una fluencia de 1200 MPa se obtiene después del tratamiento de envejecimiento. Un tratamiento de envejecimiento a más alta temperatura implica precipitados de mayor tamaño y reducción de la resistencia.

El acero tipo PH15-7Mo (15Cr-7Ni-2Mo), semiaustenítico en su condición de tratamiento de solución (austenita) su resistencia de fluencia es solamente del orden de 380 MPa la cual no

es muy diferente a la de los aceros austeníticos. Un tratamiento a 955 °C precipita carburos que desestabilizan la austenita por lo cual se transforma a martensita al enfriarse posteriormente. Luego un envejecimiento a 510 °C precipita un compuesto intermetálico de Ni-Al. La martensita envejecida puede tener una resistencia de aproximadamente 1500 MPa y de la misma manera que el caso anterior un tratamiento a más alta temperaturas implica un engrosamiento de los precipitados y el ablandamiento del acero.

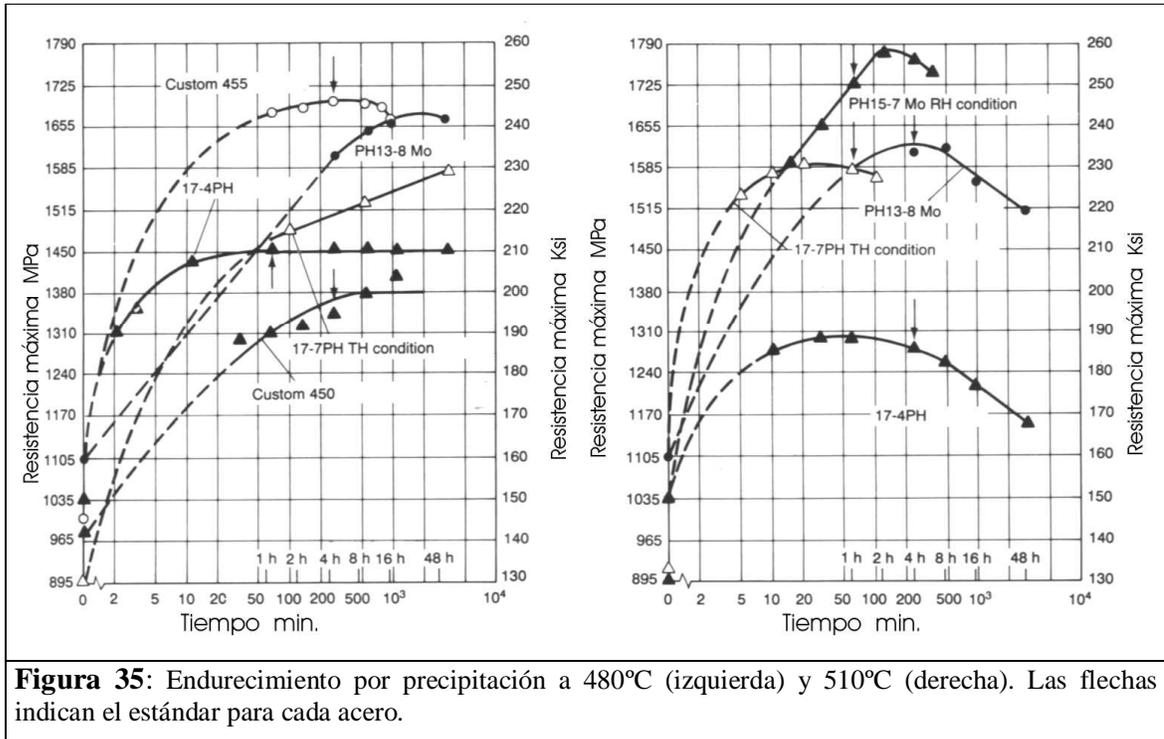


Figura 35: Endurecimiento por precipitación a 480°C (izquierda) y 510°C (derecha). Las flechas indican el estándar para cada acero.

El acero A-286 es el prototipo de los aceros PH austeníticos y su alto contenido de aleación (15Cr-25Ni-1Mo-2Ti) provee una alta resistencia a la corrosión más alta que los martensíticos y los semiausteníticos. Estos contienen fases no magnéticas los cuales los hace admisibles para usarlo en campos magnéticos. Un envejecimiento alrededor de 730 °C causa la precipitación de un compuesto intermetálicos de Ni-Ti y de esta manera endurece la aleación. En su condición de endurecimiento completo su resistencia a la fluencia es de aproximadamente 590 MPa, sin embargo, ésta es considerablemente más baja que las que se obtienen de los martensíticos o semiausteníticos.

Forma de los productos de aceros inoxidable procesados

Los productos de aceros inoxidable pueden ser obtenidos en diversas formas y sus propiedades están relacionadas con los procesos de fabricación. Dentro de la clasificación de productos procesados se encuentran las placas, hojas, tiras, laminas finas, alambres, productos semiterminados y tubos. Los procesos relacionados con estos productos son la forja, laminado en frío y en caliente, trefilado, extrudado y conformado.

Las placas son productos planos laminados o forjados de más de 450 mm de ancho y al menos 5 mm de espesor. Lo más usual es obtener las placas por laminado en caliente, a partir de tochos los cuales a su vez fueron obtenidos por laminado de los lingotes de la colada continua o directamente de éstos. Tales placas son generalmente producidas en la condición de

recocido y tienen algún proceso de limpieza superficial y/o decapado ácido para remover contaminantes tales como partículas de acero de los laminadores óxidos, etc.

Las hojas o chapas son productos planos laminados los cuales se manejan en forma de bobinas o planchas cortadas de al menos 610 mm de ancho y espesores menores a 5 mm. Para la obtención de estos productos en general se parte de bobinas laminadas en caliente y en función del espesor final se aplican procesos de laminado en frío, recocido y decapado en trenes continuos. En algunos casos se adicionan ciclos de estas mismas operaciones u otras de terminación (“skin passed” laminado en frío superficial) o acabado superficial (esmerilado o pulido). Las propiedades finales del acero dependerán de cual fue el proceso final. Por ejemplo la resistencia máxima y límite de fluencia se pueden ajustar aplicando deformación en frío controlada. Por ejemplo los aceros al cromo níquel (frecuentemente el tipo 301) o al cromo níquel manganeso (tipo 201) son producidos en las condiciones de endurecimiento por deformado en frío indicadas en la tabla 5

Las tiras son productos planos laminados en bobinas o cortes de determinados largos, de ancho menor que 610 mm y espesores menores que 5 mm. Las tiras pueden ser laminadas en frío o en caliente. Para las tiras la condición de los bordes es importante, en general se definen distintas categorías de terminación:

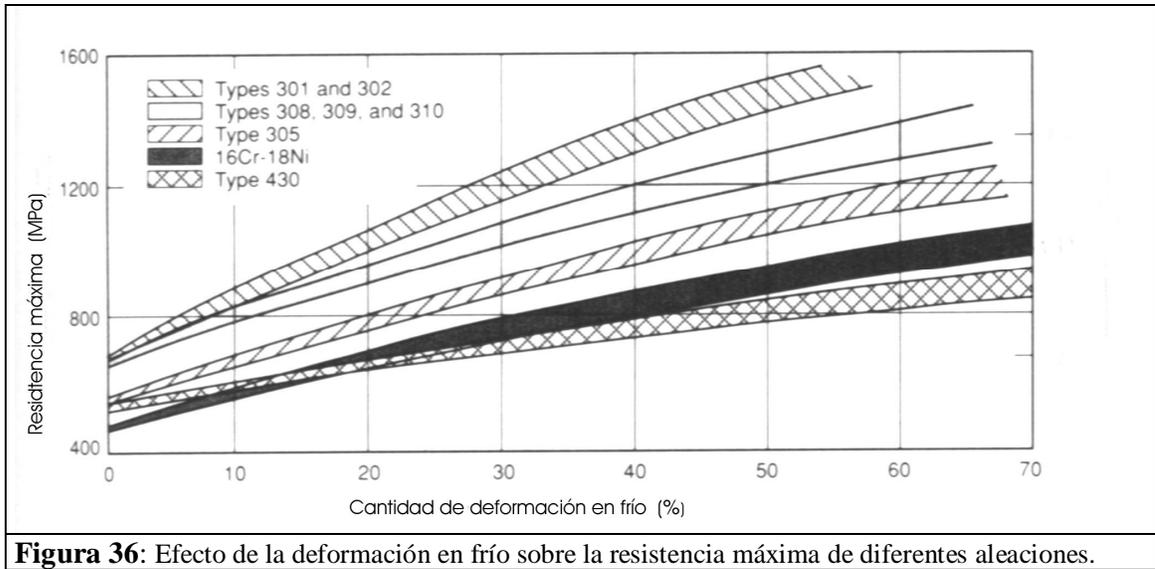
- ✓ Borde de laminación (sin especificación de terminación)
- ✓ N° 1 bordes laminados redondeados o escuadrados
- ✓ N° 3 bordes cortados en cizalla continua (slitter)
- ✓ N° 5 borde escuadrado producido por laminado después del corte.

La tolerancia del ancho deberá definirse en relación con el tipo de terminación para el borde.

Tabla 5: Variación de la resistencia en función del trabajado en frío.

Condición	Resistencia máxima Mínima (MPa)	Límite de fluencia Mínima (Mpa)
¼ dureza	860	515
½ dureza	1035	760
¾ dureza	1205	930
Dureza completa	1275	965

Las láminas son productos planos laminados comercializados en general, en forma de bobinas de hasta 0.13 mm de espesor y 610 mm de ancho. Las láminas son cortadas con las condiciones de bordes N° 3 y N° 5 de las tiras. Las propiedades mecánicas en general varían con el espesor, la resistencia máxima aumenta y la ductilidad disminuye a medida que decrece el espesor.



Las barras son productos obtenidos por laminación en caliente o en frío y están disponibles en varias formas y tamaños y distinta terminación superficial. Esta categoría incluye también pequeñas formas las cuales no exceden los 127 mm y laminados en caliente planos hasta 254 mm de ancho.

Las barras terminadas en caliente (hot-finished) pueden ser obtenidas por diferentes procesos tales como laminado, forjado o extrudado. Seguido de estos procesos generalmente se pueden aplicar varias operaciones que incluyen: recocido u otros tratamientos, decapado, limpieza por proyección de partículas, acondicionamiento de la superficie por esmerilado o corrección de rectilineidad.

Las barras terminadas en frío son generadas a partir de productos terminados en caliente las cuales mediante laminado o trefilado son reducidas alcanzando tolerancias de fabricación más estrechas, mejor terminación superficial y más alta resistencia máxima y de fluencia. Las barras terminadas en frío pueden ser luego procesadas por maquinado, rectificado y pueden ser pulidas para mejorar la terminación. Estos procesos en general no alteran las propiedades mecánicas, algunos incrementan la dureza particularmente en la superficie y en los aceros de las series 200 y 300.

Las barras de mecanizado libre son usadas para máquinas automáticas en la fabricación de tornillos o partes de producción en series. Los grados principales son 303, 303Se, 416, 416Se, 420F, 430F y 430Fse.

Las formas estructurales son laminados en caliente y consisten en ángulos, tes, canales, perfiles zeta o doble I. Estos puede estar disponibles en varias condiciones. Laminado en caliente simple y recocido o con limpieza por arenado o química.

Los alambres son producidos por terminación en frío, a partir de laminado en caliente. Generalmente son recocidos y bobinados y poseen muy buena precisión de terminación y una superficie finamente terminada.

Los productos tubulares son en general obtenidos a partir de tiras y soldados longitudinalmente en formas cilíndricas. Pueden ser usados para transporte de sólidos, líquidos y gases o para construir estructuras para lo cual se fabrican de formas cuadradas, rectangulares, ovals, etc.

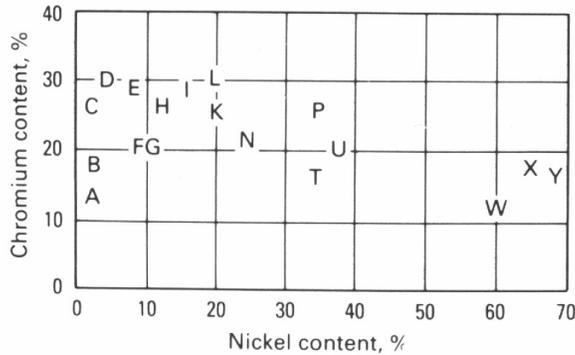


Figura 37: Contenido de cromo y níquel en los grados estándar de ACI

Aceros inoxidables fundidos

Los aceros inoxidables fundidos son ampliamente usados por su resistencia en medios acuosos a temperatura ambiente o próxima a ésta y en gases o líquidos calientes. En general los aceros procesados y los fundidos poseen una resistencia a la corrosión media equivalente y son empleados ambos conjuntamente. Sin embargo, existen importantes diferencias entre alguna aleaciones fundidas y su contraparte procesada. Una significativa diferencia está en la microestructura ya que las aleaciones

austeníticas fundidas poseen una pequeña cantidad de ferrita que contrasta con la fase simple encontrada en los aceros procesados.

La presencia de ferrita en las fundiciones austeníticas es deseable para facilitar las reparaciones con soldadura pero además también incrementa la resistencia al picado y a la SCC. Muy pocas fallas de SCC se han observado en fundiciones de aceros inoxidables en comparación con las ocurridas en aceros procesados. La razón principal esta dada aparentemente debido al agregado de silicio para mejorar la fluidez resulta beneficioso.

Los aceros inoxidables procesados y las fundiciones pueden tener también diferencias en las propiedades mecánicas, propiedades magnéticas y distribución de los elementos químicos. Esto es debido a la existencia de grandes dendritas, fases intergranulares y segregación de elementos de aleación y por lo tanto dichas propiedades son inferiores en las aleaciones fundidas.

Designación de las aleaciones fundidas

Las aleaciones fundidas son más frecuentemente especificadas sobre la base de la composición. La designación de ACI (Alloy Casting Institute, actualmente reemplazada por The High Alloy Product Group of the Steel Founders' Society of America) es una de las más difundidas. La primera letra de la designación indica las características a la cual está dirigida la aleación, F para servicios de corrosión en líquidos y H para servicios en alta temperatura.

El segundo dígito es una letra que se incrementa con el contenido de níquel. En la figura 37 se observa la letra correspondiente al segundo dígito en función del contenido de níquel. El siguiente o siguientes dígitos numerales indica el máximo contenido de carbono (% x 100). Finalmente, si más elementos de aleación están presentes son indicados por una o más letras. Por ejemplo CF-8M, está referido a una aleación para resistencia a la corrosión (C) con 19Cr-9Ni (figura 1), con un máximo de carbono de 0.08 % y contiene molibdeno (M).

Composición y microestructura

Los aceros inoxidables pueden ser también clasificados como austeníticos, ferríticos, martensíticos y duplex. La estructura de un grado particular está primariamente determinada por su composición. En general, como ocurre en los inoxidables procesados los aceros al cromo son ferríticos o martensíticos dependiendo del contenido de cromo, ferríticos si el cromo es alto o martensíticos con menos cromo y algo de carbono.. Los aceros al cromo níquel pueden ser austeníticos o duplex dependiendo de la misma manera del níquel. Aquellos que posean más alto níquel serán completamente austeníticos

En los aceros austeníticos el contenido de ferrita se puede estimar por el diagrama de Schoefer en el cual se emplea la relación de Cr equivalente y Ni equivalente. Este diagrama fue derivado del diagrama de Schaeffler usado en soldadura.

Para el uso del diagrama es necesario convertir los elementos estabilizadores de la ferrita como Cr equivalentes y los estabilizadores de austenita en Ni equivalentes. Para ello se pueden usar las siguientes expresiones:

$$Cr_{eq} = \%Cr + 1.5(\%Si) + 1.4(\%Mo) + \%Nb - 4.99$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30(\%C) + 0.5(\%Mn) + 26(\%N - 0.02) + 2.77.$$

El diagrama de Schoefer es útil para estimar el contenido de ferrita que corresponde a una determinada composición, no obstante, la composición no es el único factor que determina el contenido de ferrita por lo que éste debe ser tomado sólo como una estimación, obsérvese que en la figura 38 se muestra una banda que está asociada a la incertidumbre. Lo restantes factores están relacionados con el volumen de las piezas, segregación de elementos de aleación y otros factores.

Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos aplicables a los aceros inoxidable fundidos son muy similares a los aplicables a los aceros procesados. No obstante, algunas diferencias existen respecto a algunas aplicaciones. Debido a que no estarán sometidos a reducción mecánica a altas temperaturas los tratamientos de homogenización son frecuentemente empleados para uniformizar la composición y la microestructura. Estos son practicados a temperaturas de 1095 °C o superiores.

El recocido completo de las fundiciones martensíticas resulta en una recristalización y un ablandamiento máximo de la aleación pero es menos efectivo que la homogenización para eliminar segregación.

La homogenización es un procedimiento común de tratamiento térmico en los aceros inoxidable de endurecimiento por precipitación.

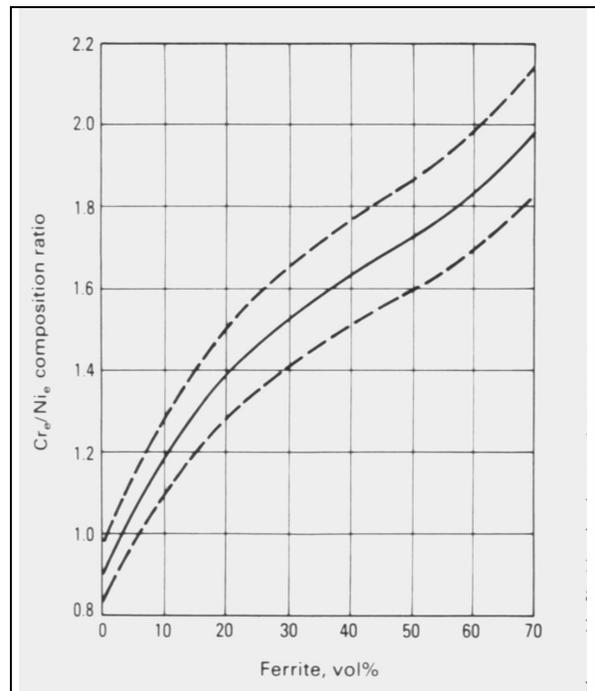


Figura 38: Diagrama de Schoefer para estimar el contenido de ferrita en aceros fundidos.

Referencias bibliográficas

Stainless Steels, ASM Specialty Handbook, J.R. Davis, ASM International, 1994.

Development of the Stainless Steels, Armco Advanced Materials Corporation, 1983.

Design Guidelines for the Selection and Use of Stainless Steel, Specialty Steel Industry of North America, 1995.

Irons, Steels and High Performance Alloys, ASM Handbook, Vol. 1, 10th edition, 1990.