XVI- TRATAMIENTOS TERMICOS DE LOS ACEROS INOXIDABLES

La mayoría de los metales se oxidan; la plata se pone negra, el aluminio cambia a blanco, el cobre cambia a verde y ordinariamente el acero cambia a rojo. En el caso del acero, el hierro presente se combina con el oxígeno del aire para formar óxidos de hierro o "herrumbre".

A principios del siglo XX algunos metalurgistas descubrieron que adicionando poco más de 10% de cromo al acero, éste no presentaba herrumbre bajo condiciones normales; la razón de ello es que el cromo suele unirse primeramente con el oxígeno del aire para formar una delgada película transparente de óxido de cromo sobre la superficie del acero y excluye la oxidación adicional del acero inoxidable. Esta película se llama capa pasiva. En el caso de que ocurra daño mecánico o químico, esta película es auto reparable en presencia de oxígeno.

Los *aceros inoxidables* son aleaciones de bases de hierro, que contienen cromo, carbono y otros elementos, principalmente níquel, molibdeno, manganeso, silicio y titanio. El cromo, que se encuentra en un porcentaje no inferior al 10 %, le confiere la propiedad de ser mucho más resistente a la corrosión que lo que sería el hierro sin la presencia de este aleante. Esta característica se debe a la pasivación de la aleación en un ambiente oxidante.

Estas aleaciones adquirieron gran importancia; son muy utilizadas en una amplia variedad de aplicaciones de la industria, ya que además de ser resistentes a la corrosión tienen muy buenas propiedades mecánicas.

Se clasifican en cinco familias diferentes; cuatro de ellas corresponden a las estructuras cristalinas particulares formadas en la aleación: austenita, ferrita, martensita y dúplex (austenita más ferrita); mientras que la quinta corresponde a aleaciones endurecidas por precipitación, basadas más en el tipo de tratamiento térmico usado que en la estructura cristalina.

Entre las normalizaciones más consideradas se encuentran las de AISI (Instituto Americano del Hierro y el Acero, American Iron and Steel Institute) y las de SAE (Sociedad de Ingenieros de Automoción, Society of Automotive Enginers).

Clase	Clasificación AISI-SAE	Ejemplos de especificación
Martensíticos	SERIE 400	410,420,431
Ferríticos		409,430,434
Austeníticos	SERIE 200 y 300	304,321,316

Los tratamientos térmicos en aceros inoxidables se realizan para producir cambios en las condiciones físicas, propiedades mecánicas, nivel de tensiones residuales y restaurar la máxima resistencia a la corrosión. Frecuentemente en el mismo tratamiento se logra una satisfactoria resistencia a la corrosión y óptimas propiedades mecánicas.

XVI.1. Aceros inoxidables austeníticos

Son esencialmente terciarios, (Fe, Cr, Ni); contienen entre 16 y 25% de Cr, 7 y 20% de Ni, y 0.03 y 0.08% de C. Se denominan austeníticos debido a su estructura FCC, de hierro γ, a todas las temperaturas normales de tratamientos térmicos. Esta propiedad la proporciona el níquel. Su presencia, como así también manganeso, carbono y nitrógeno, es necesaria para bajar la temperatura del intervalo γ y evitar la transformación alotrópica γ-α. En la Fig. XVI.1 se muestran una serie de diagramas de equilibrio Fe-C con 18% Cr y

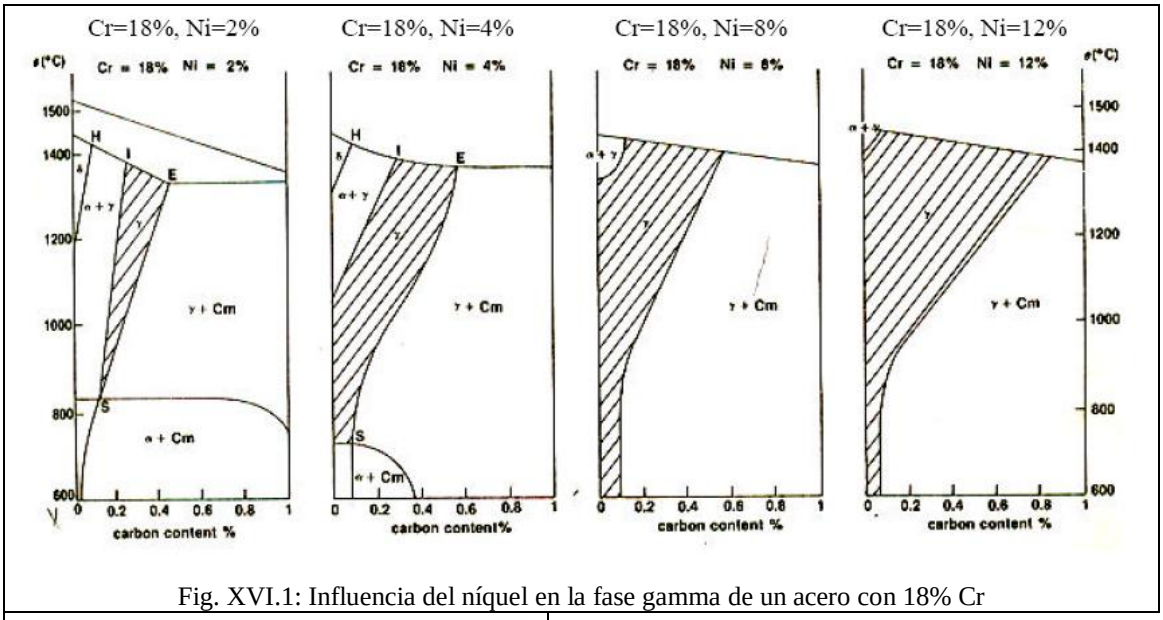

Fig. XVI.1: Influencia del níquel en la fase gamma de un acero con 18% Cr

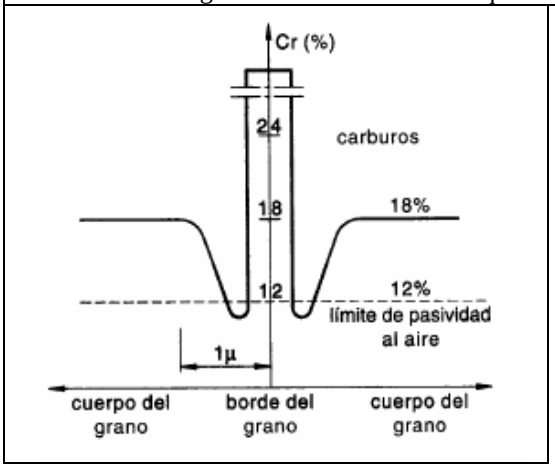

Fig. XVI.2: Variación del contenido de Cr en el entorno de dos cristales contiguos, con presencia de carburos de cromo precipitados en un acero austenítico del tipo AISI 304. El Cr libre desciende en la zona adyacente al carburo, a contenidos inferiores al límite de pasividad de la aleación.

contenidos crecientes de níquel, donde se observa la influencia de éste para expandir el campo γ (austenita).

Estos aceros normalmente tienen mayor resistencia a la corrosión que los ferríticos y martensíticos, porque los carburos de cromo se descomponen y los elementos permanecen en solución sólida por enfriamiento rápido desde alta temperatura. Sin embargo si se enfría lentamente, como en los procesos de soldadura, entre 870 y 600º C precipitan carburos de cromo en bordes de grano dejando pobre en Cr la zona vecina al borde, lo que facilita el fenómeno denominado "corrosión intergranular". Para evitarlo se puede bajar al mínimo el contenido de C (0.03 %), o bien agregar niobio o titanio; estos elementos tienen mayor tendencia a formar carburos que el Cr, permitiéndole a este último permanecer en solución sólida en el hierro y así mantener su capacidad de resistencia a la corrosión. La Fig. XVI.2 esquematiza este inconveniente.

Los aceros austeníticos se pueden dividir en dos categorías, según la clasificación AISI:

- **Serie AISI 300**. Aleación de Cromo-Níquel.
- **Serie AISI 200**. Aleación de Cromo-Manganeso-Nitrógeno.

La Serie 300 es la más extensa y comúnmente utilizada, con porcentajes de níquel entre 6 y 37% para estabilizar la austenita. También pueden contener molibdeno, cobre, silicio, aluminio, titanio y niobio, elementos que son utilizados para conferir ciertas características. La Tabla XVI.1 muestra algunos ejemplos de estos aceros.

En la Serie 200 el níquel se encuentra en menor proporción (hasta 6%) y mantienen la estructura austenítica con altos niveles de nitrógeno. El manganeso, de 5 a 10%, es necesario para aumentar la solubilidad del nitrógeno en la austenita. Se caracterizan por un alto valor de límite elástico y tensión de rotura pero su ductilidad es baja si se compara con los de la serie 300. En la Tabla XVI.2 se muestran algunos ejemplos.

Las principales características de los inoxidables austeníticos se deben, en general, a su estructura FCC, que le trasfiere una gran ductilidad, conformabilidad, tenacidad y excelente resistencia al impacto,

siendo materiales que se pueden endurecer por trabajo en frío, aunque no por tratamientos térmicos.

La resistencia a la oxidación es muy superior a los otros tipos de aceros inoxidables por lo expuesto anteriormente, lo que favorece los procesos de soldadura que pueden realizarse perfectamente; gracias a esto son muy utilizados para la fabricación de envases y cañerías para la industria química y petroquímica, donde la corrosión es una condición de servicios determinante.

Suelen no ser magnéticos, pero pueden serlo cuando se trabajan en frío. El conformado en frío es una vía para mejorar sus propiedades mecánicas, específicamente el límite elástico, que es relativamente bajo con respecto a otros materiales. Entonces, la reducción en sección o el trabajo en frío aumentan el valor del límite elástico y la tensión de rotura, mientras disminuye la capacidad del acero al alargamiento.

Tabla XVI.1 Aceros inoxidables austeníticos serie 300

Tipo AISI	Descripción	Aplicaciones más comunes
302 (18% Cr, 8% Ni)	Aleación básica	
303 (18% Cr, 9% Ni, 0.15% S)	Agregado de S para mejorar maquinabilidad.	Conectores, cerraduras, tuercas y tornillos, partes maquinadas, partes para bombas.
304 (18% Cr, 8% Ni)	Menos % C (0.08%) que el 302 para mejorar resistencia a la corrosión intergranular.	Equipo químico de procesos, manejo de alimentos y equipos para hospitales.
304L (18% Cr, 8% Ni)	Menos de 0.03% C (para reducir los riesgos de corrosión intergranular.	Reducción de carbono para evitar la corrosión intergranular en la soldadura.
309/309S (23% Cr, 13% Ni)	Más Cr y Ni para aumentar la resistencia a la formación de escamas a altas temperaturas. 309 0.2% C y 309S 0.08% C	Calentadores de aire, equipos para tratamientos térmicos de aceros.
316 (17% Cr, 12% Ni, 3% Mo)	Agregado de Mo, mejora la resistencia a la tracción a altas temperaturas. 0.08%C	Equipos para el procesamiento de alimentos, farmacéuticos, fotográficos, textil.
316 L (17% Cr, 12% Ni, 3% Mo)	Reducción del % de C para evitar la corrosión intergranular durante la soldadura. 0.03%C.	Intercambiadores de calor, prótesis temporarias.
330 (21% Cr, 36% Ni)	Más Ni para aumentar la resistencia al shock térmico y carburación.	Hornos de recocido, partes para turbinas de gas e intercambiadores de calor.
347 (18% Cr, 10% Ni)	Estabilizado con Nb y Ta para evitar los carburos de Cr.	Tanques soldados para el almacenamiento de sustancias químicas orgánicas.

Tabla XVI.2: Aceros inoxidables austeníticos serie 200

Tipo AISI	Descripción
201 (6% Mn, 0.25% N además 4.5% Ni, 17% Cr, 0.15% C)	Se reemplaza parcialmente el Ni por N y Mn.
202 (8% Mn y 0.25% N, además 5% Ni, 0.15% C, 18% Cr)	Se reemplaza parcialmente el Ni por N y Mn.
205 (15% Mn y 0.35% N, además 1.5% Ni, 0.2% C, 17% Cr)	Se reemplaza parcialmente el Ni por N y Mn.

XVI.1.2. Tratamientos térmicos de los aceros inoxidables austeníticos

En base a la clasificación anterior, se dividen en tres grupos:

a) composiciones inestabilizadas: 201, 202, 301, 302, 303, 304, 305, 308, 309, 310, 316, y 317,

b) composiciones estabilizadas, principalmente los tipos 321, 347 y 348, y

c) grados de extra bajo carbono, tales como 304Ly 316L.

En la carga del horno se debe tener en cuenta que su expansión térmica es alrededor del 50 % más

elevada que en los aceros al C; por ello, el espacio entre las piezas debe ser adecuado.

XVI.1.2.1. Composiciones inestabilizadas

No pueden endurecerse por tratamiento térmico, pero sí por trabajado en frío. Estos aceros son recocidos para asegurar la máxima resistencia a la corrosión y restaurar la máxima ductilidad y ablandamiento. Durante el recocido, los carburos que decrecen marcadamente la resistencia a la corrosión intergranular, se disuelven. Las temperaturas de recocido varían algo con la composición, como se ve en la Tabla XVI.3.

Como la precipitación de los carburos puede ocurrir entre los 400 y 840ºC, es deseable realizar el recocido sobre este límite. Además es necesario que los carburos estén disueltos antes de comenzar el enfriamiento, y como esto ocurre muy lentamente, se elige la temperatura más elevada que no aumente el tamaño de grano, cercana a los 1090º C.

El enfriamiento debe ser rápido pero consistente con las limitaciones de distorsión. El mejor temple es el agua, porque los carburos disueltos permanecen en solución; no obstante, cuando las piezas son delgadas y el temple en agua produce distorsión, será necesario enfriar en aire forzado. Si en este caso llegaran a precipitarse carburos, la solución será utilizar acero inoxidable estabilizado.

Tabla XVI.3: Temperaturas recomendadas para tratamientos térmicos de aceros inoxidables austeníticos inestabilizados

Tipo	**Temperatura (ºC)**
201, 202	1010 a 1120
301, 302, 302B, 303, 303Se	1010 a 1120
304, 305, 308	1010 a 1120
309, 309S	1040 a 1120
310, 310S	1040 a 1065
314	1040 a 1120
316	1040 a 1120
317	1065 a 1120

Estabilizados

309C	1065 a 1120
318	1040 a 1120
321	950 a 1065
347, 348	980 a 1065

Grados de extra bajo carbono

304L	1010 a 1120
316L, 317L	1040 a 1110

XVI.1.2.2. Composiciones estabilizadas

Contienen cantidades controladas de Titanio, Niobio o Tantalio, que hacen al acero inmune a la precipitación intergranular de los carburos de Cromo. Necesitan tratamiento térmico para distensionar, incrementar la ductilidad y ablandamiento o proveer una estabilidad adicional.

Para lograr la máxima ductilidad son recocidos a la temperatura indicada en la Tabla XVI.3. Como no requieren enfriamiento al agua para prevenir la formación de carburos de cromo, generalmente es adecuado enfriar en aire. Sin embargo espesores mayores a 7 mm. deberían enfriarse en agua o aceite para la máxima retención de la austenita.

Cuando se requiere la máxima resistencia a la corrosión en el tipo 321, puede ser necesario emplear un tratamiento térmico correctivo conocido como recocido de estabilización, que consiste en mantener a 815-900º C por 5 horas, (dependiendo del espesor del material), y puede ser seguido por un corto tiempo para distensionar a 700° C, sin el peligro de ninguna precipitación de carburos.

El tiempo a temperatura y el método de enfriamiento dependen del espesor. Las secciones delgadas deben mantenerse a temperatura 3 a 5 min por cada 2,5 mm de espesor, seguido de enfriamiento en aire agitado. Los espesores mayores pueden templarse en agua.

Deben tenerse en cuenta ciertas restricciones al tipo de atmósfera del horno, controlándola cuidadosamente para eliminar cualquier carburización o excesiva oxidación. La estabilidad de estos aceros

está basada en el % de C original y cualquier absorción de C no puede tolerarse. Por otro lado, la excesiva oxidación causa la formación de cascarilla difícil de remover.

En la Fig. XVI.3 se muestra el efecto del alivio de tensiones sobre la tasa de corrosión en un acero inoxidable 347medido en 65% HNO_3 hirviendo durante 2 h. La Fig. XVI.4 grafica el alivio de tensiones obtenido en un acero del tipo 347, en función de la temperatura, tensiones iniciales y tiempo a temperatura.

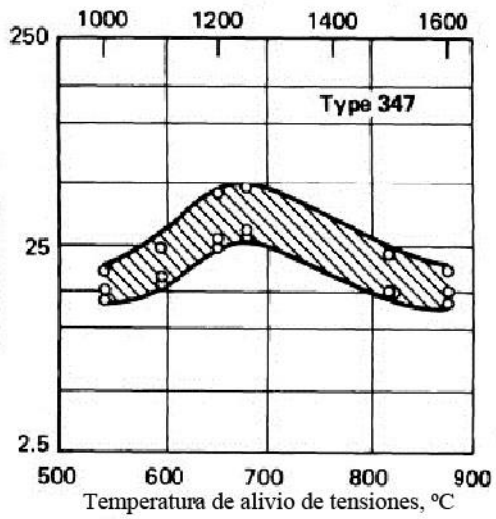

Fig. XVI.3: Efecto del alivio de tensiones sobre la tasa de corrosión en un acero inoxidable 347 en 65% HNO_3 hirviendo durante 2 h.

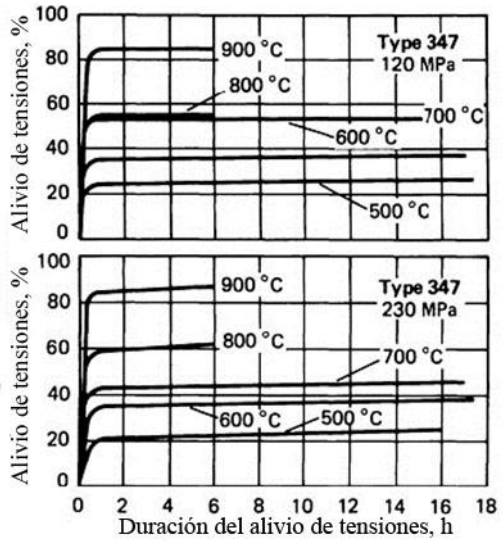

Fig. XVI.4: Alivio de tensiones obtenido en un acero del tipo 347, en función de la temperatura, tensiones iniciales y tiempo a temperatura.

XVI.1.2.3. Composiciones de extrabajo C (tipo 304 L, 316 L, 317 L)

El contenido de C (0,03 % máx.) es suficientemente bajo para reducir la precipitación de carburos intergranulares a un nivel seguro. En este sentido, son intermedios, entre las composiciones estabilizadas y no estabilizadas.

Estos aceros pueden mantenerse entre 420 y 815° C durante 2 hs y enfriarse lentamente sin el peligro de precipitación intergranular, pero de todas maneras si los tiempos a esa temperatura son prolongados, no son totalmente inmunes a la formación de carburos que deterioren la resistencia a la corrosión. No requieren, como los aceros inestabilizados, enfriarse en agua luego del proceso de recocido. Las temperaturas normales se encuentran en la Tabla XVI.3.

XVI.1.3. Permeabilidad magnética:

Las aleaciones de muy bajo C son usadas frecuentemente en la producción de artículos que requieran baja permeabilidad magnética. Estos materiales son no-magnéticos en su condición de totalmente recocidos (permeabilidades de 1,02 máx a 200 gaus), pero pueden desarrollar ferromagnetismo cuando se los trabaja en frío durante la fabricación, debido a que puede generarse algo de ferrita o martensita de bajo % de C. Un recocido puede restaurar la condición de totalmente austeníticos.

XVI.1.4. Recocido brillante:

Todos los grados de austeníticos pueden ser recocidos en hidrógeno puro o amoníaco disociado, con bajo punto de rocío. Si el punto de rocío no está controlado, se puede formar una leve capa verdosa de óxido, difícil de remover por métodos comunes de decapado. En el caso de utilizar amoníaco disociado, debe ser el 100 % disociado antes de entrar al horno, sino podría producirse una nitruración objetable.

XVI.2. Aceros inoxidables ferríticos

Los aceros inoxidables ferríticos mantienen la estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC) del Fe alfa desde la temperatura ambiente hasta el punto de fusión, ya que no atraviesan el campo austenítico

(FCC) durante el calentamiento.

Son magnéticos y contienen como aleante principal, el cromo. Los aceros con un contenido en cromo superior al 16 % no pueden someterse a calentamientos a temperaturas intermedias, por el peligro de aparición de la fase Sigma (FeCr), que provoca una reducción en la ductilidad y en la resistencia a la corrosión, razón por la que la soldadura presenta problemas.

El contenido de carbono en estos aceros es mucho menor que en los martensíticos, con el fin de obtener una estructura totalmente ferrítica. Además, cuando el contenido de carbono es grande, se forman carburos de cromo, empobreciendo de cromo la matriz y disminuyendo por lo tanto su resistencia a la corrosión. Este carburo provoca fragilización en la estructura de la aleación. En relación a su comportamiento frente a la corrosión, ocupan un lugar intermedio entre los martensíticos y austeníticos.

En Fig. XVI.5 se muestra una clasificación de los distintos tipos de aceros inoxidables ferríticos.

Una característica mecánica a destacar, común a los aceros ferríticos y martensíticos, debido a su estructura BCC, es que poseen una temperatura de transición dúctil-frágil, por debajo de la cual la tenacidad resulta muy baja.

La estampabilidad es buena, aunque insuficiente en aplicaciones que requieren estampado profundo.

Estos aceros no responden a los tratamientos térmicos; no toman temple y revenido, su estructura permanece ferrítica sin ser afectada por la velocidad de enfriamiento desde altas temperaturas. Las elevadas resistencias o durezas sólo se pueden alcanzar por trabajo en frío (laminado o estirado), aunque en forma bastante limitada.

Como se ha mencionado son, en general por su constitución, frágiles; y su tenacidad, que en gran parte es función del tamaño de grano, depende del proceso de trabajado seguido en su fabricación. Si se ha procurado afinar el grano por trabajo en frío, el acero tendrá tenacidad mucho más alta que si, en el tratamiento final, experimentara un calentamiento a alta temperatura, que hace crecer el grano.

A pesar de su fragilidad en frío, tienen buena tenacidad en caliente y la resiliencia aumenta extraordinariamente con simple calentamiento a 150-200º C. Esto tiene gran importancia en piezas que deban trabajar en servicio, o que sean trabajadas, a temperatura elevada; cuando el material es más tenaz, resiste mejor muchas deformaciones sin romperse.

El efecto del nitrógeno en las propiedades de los aceros es, en cierto modo, parecido al del carbono: favorece la templabilidad y por lo tanto el endurecimiento del material. Además, su acción mejora la tenacidad, retarda el crecimiento del grano a temperatura elevada, lo que amplía mucho las posibilidades de utilización de estos aceros para trabajos en calientes.

Otro método para mejorar la tenacidad de los aceros ferríticos es la adición de pequeñas cantidades de columbio y titanio, que actúan en cierto modo inversamente al nitrógeno, ya que tienden a disminuir su templabilidad.

Una gran mejoría en muchas propiedades, se consigue con la introducción de níquel como elemento aleante. Entre estas propiedades se pueden distinguir el aumento de resistencia y límite de elasticidad, sin disminuir la tenacidad. Con determinados tenores de níquel es posible conseguir un cambio de la estructura ferrítica hacia austenítica.

XVI.2.1. Aplicaciones

El **Grupo 1**, con el contenido de cromo más bajo de todos los aceros inoxidables, es también el menos costoso. Este grupo puede ser perfecto en entornos libres o poco corrosivos, en los que una ligera corrosión localizada puede ser aceptable. El 405 se diseñó originalmente para los silenciadores de los sistemas de escape, y se recomienda tal cual soldado. El 409 se utiliza más para contenedores, autobuses y automóviles y, recientemente, para bastidores de monitores LCD.

El **Grupo 2** (tipo 430) es la familia de aleaciones ferríticas de uso más generalizado. Con un contenido de cromo más elevado, el grupo 2 ofrece una mayor resistencia a la corrosión y su comportamiento es prácticamente igual al del 304, por lo que puede reemplazarlo en algunas aplicaciones. Los usos típicos son tambores de lavadoras y paneles interiores. Con frecuencia se sustituye el 430 por el 304 en lavaplatos, cazuelas y sartenes.

Uno de los mayores problemas del inoxidable 430 es la pérdida de ductilidad en las regiones soldadas, que normalmente son frágiles y de menor resistencia a la corrosión. El elevado crecimiento del tamaño de grano, la formación parcial de martensita y la precipitación de carbonitruros de cromo, son las principales causas generadoras de este problema.

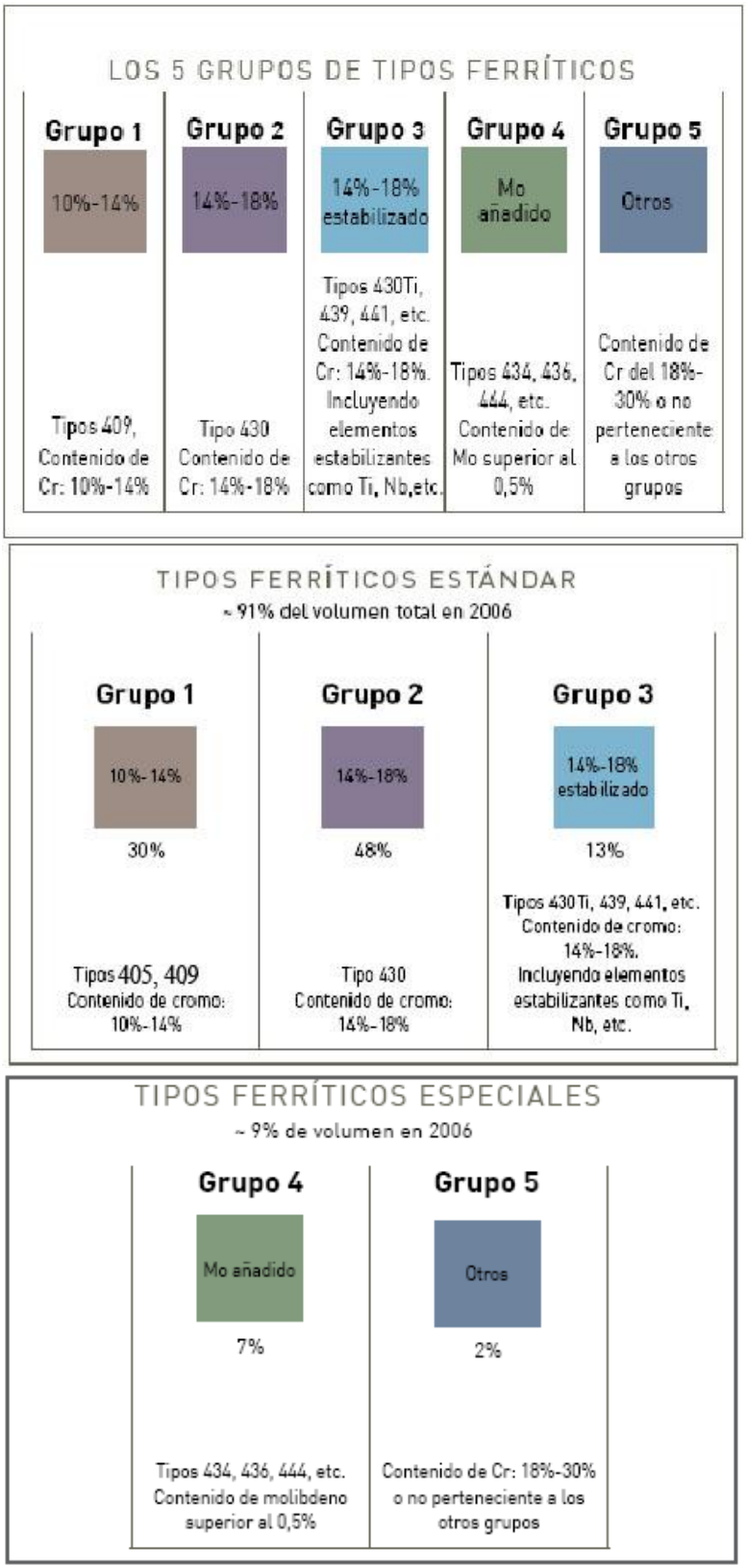

Fig. XVI.5: Tipos de aceros inoxidables ferríticos

El **Grupo 3** incluye los tipos 430Ti, 439, 441, etc. A comparación del grupo 2, ofrecen una mejor soldabilidad y conformabilidad. En muchos casos, su comportamiento es incluso mejor que el del 304. Las aplicaciones típicas son fregaderos, tubos de intercambiadores, sistemas de escape (vida de servicio más larga que el tipo 405) y piezas soldadas de lavadoras. El grupo 3 puede incluso reemplazar al tipo 304 en aquellas aplicaciones en las que las especificaciones sean superiores a las necesidades reales.

El **Grupo 4,** que incluye los tipos 434, 436, 444, etc., incorpora molibdeno para aumentar la resistencia a la corrosión. Las aplicaciones típicas son depósitos de agua caliente, calentadores solares,

sistemas de escape, hervidores eléctricos y hornos microondas, guarniciones de automóviles y paneles exteriores. La resistencia a la corrosión del tipo 444 puede ser similar al 316.

El **Grupo 5** (tipos 446, 445/447, etc.) lleva cromo adicional y molibdeno para aumentar la resistencia a la corrosión y a la formación de cascarilla (oxidación). Este grupo es superior al tipo 316 en lo relativo a estas propiedades. Los usos típicos incluyen aplicaciones en entornos costeros y otros entornos altamente corrosivos. La resistencia a la corrosión del 447 es igual a la del titanio.

XVI.2.2. Ventajas de los aceros inoxidables ferríticos

1. Son magnéticos.
2. Presentan una dilatación térmica baja, menor que los austeníticos.
3. Ofrecen una excelente resistencia a la oxidación a altas temperaturas (son menos propensos a la formación de cascarilla).
4. Ofrecen una elevada conductividad térmica (transmiten el calor de manera más uniforme que los austeníticos).
5. Los estabilizados con niobio ofrecen una excelente resistencia a la fluencia (menor deformación frente a tensiones de larga duración)
6. Son más fáciles de cortar y trabajar que los austeníticos (que requieren herramientas especiales y máquinas más potentes, generando un mayor desgaste de las herramientas).
7. Son menos propensos a la recuperación elástica que los austeníticos, en el conformado en frío.
8. Ofrecen un mayor límite elástico (similar al de los aceros al carbono habituales) que los austeníticos del tipo 304.
9. No sufren fisuración por corrosión bajo tensión.

XVI.2.3. Desventajas de los aceros inoxidables ferríticos

1. Excesivo crecimiento de grano: la falta de recristalización por cambio alotrópico de ferrita a austenita de estos aceros, provoca que se intensifique el crecimiento de grano por encima de 950º C, dando lugar a un grano grueso con menor ductilidad y tenacidad que el grano fino. La única manera de afinar el grano es con un tratamiento de recristalización precedido de un proceso de deformación plástica. En el caso de las soldaduras éste es un problema serio pues no puede realizarse este tratamiento.
2. Sensibilización: los aceros inoxidables ferríticos pueden generar, durante el calentamiento a más de 900º C, algo de austenita en el borde de grano ferrítico, ya sea por segregación del cromo o por estar próximos al bucle gamma. Si esta transformación va seguida de un enfriamiento rápido, la austenita se transforma en martensita, disminuyendo la plasticidad y sobre todo la resistencia a la corrosión en el borde de grano. Por este motivo estos aceros deben tener un enfriamiento lento a partir de 1000º C.
3. Pérdida de ductilidad por presencia de fases: a medida que aumenta la proporción de cromo de estos aceros, se acercan a la transformación de Fe_α a la fase intermetálica sigma. Esta fase σ es dura y frágil, y se forma durante el intervalo de enfriamiento de 870 a 530º C, lo cual fragiliza la estructura. Puede ser redisuelta con calentamientos del orden de 1100º C, y evitar su formación con enfriamientos rápidos que retengan la fase alfa.

XVI.2.4. Tratamientos térmicos de los aceros inoxidables ferríticos

Los tipos 405, 430, 430 F, 430 F(Se), 442 y 446 no son apreciablemente endurecidos por temple pero desarrollan la máxima ductilidad, ablandamiento y resistencia a la corrosión en el estado de recocido, y este es el único tratamiento térmico aplicable a las aleaciones ferríticas. Su objetivo es primariamente eliminar tensiones de soldadura o trabajado en frío. Además se eliminan productos de transformación desarrollados durante la soldadura, como fragilidad de 475°C. Por ello, las temperaturas de recocido están por encima de ese rango y debajo de aquellas a la cual pueda formarse austenita. En la Tabla XVI.4 se indica la práctica corriente para el recocido de los grados ferríticos.

Aún estos grados pueden tener austenita, o martensita sin revenir de una transformación parcial de la austenita a elevada temperatura. Se adiciona aluminio al tipo 405 para eliminar o minimizar su formación o descomposición durante la soldadura.

XVI.2.4.1. Fragilidad a 475°C

Una forma importante de fragilidad en los grados ferríticos se desarrolla por prolongada exposición o enfriamiento dentro del rango de temperatura de 400 a 530° C, con máximo efecto dentro de 475-485° C. La resistencia al impacto con entalla es la propiedad afectada más adversamente. Se cree que esta fragilidad es causada por la precipitación de una ferrita con alto cromo y su efecto se incrementa con el % de Cromo (el

máximo efecto se produce en el tipo 446).

Esta condición puede ser eliminada por cualquiera de los tratamientos de recocido indicados en la tabla XVI.4, utilizando temperaturas claramente superiores y enfriando rápidamente para prevenir que la fragilidad aparezca nuevamente.

Tabla XVI.4: Temperaturas recomendadas para tratamientos térmicos de aceros inoxidables ferríticos

Tipo	Temperatura (º C) y medio de enfriamiento
405	650 a 815, enfriado al aire o agua
430	700 a 790, enfriado al aire o agua ó 815 a 900, enfriado en horno (4 a 10º C/hora hasta 600º C), seguido de enfriado al aire.
430F	700 a 790, enfriado al aire o agua
442	760 a 830, enfriado al aire o agua
446	760 a 830, enfriado al aire o agua

XVI.2.4.2. Fase sigma:

Como se dijo, es un constituyente metalográfico que se forma lentamente a elevada temperatura, cuando el contenido de Cr supera al 16 %, o en un Cr-Ni conteniendo más del 18% de Cr.

La fase sigma incrementa la dureza, decrece la ductilidad, resistencia al impacto y a la corrosión. Su menor temperatura de formación depende especialmente del tiempo de exposición y se puede estimar en 530° C, la máxima temperatura depende del contenido de aleación. Puede disolverse por calentamiento a 900º C.

XVI.2.4.3 Tratamiento de alivio de tensiones:

La presencia de tensiones residuales puede conducir a fallas por corrosión bajo tensión, y producir una reducción en la resistencia al creep a elevadas temperaturas. Este tratamiento se aplica para eliminar tensiones remanentes de los procesos de manufactura, a diferencia de los tratamientos posteriores a las soldaduras, en los que también se modifican ciertas estructuras metalúrgicas o propiedades. Por ejemplo, en la mayoría de las soldaduras se requiere un tratamiento posterior para mejorar la tenacidad a la fractura de la zona afectada por el calor.

El tratamiento de alivio de tensiones es el calentamiento uniforme de una estructura, o porción, a una temperatura adecuada por debajo del rango crítico (Ac_1 para aceros ferríticos), mantenerla durante un tiempo pre-determinado, seguido de enfriamiento uniforme. Esto último debe cuidarse especialmente, sobre todo en piezas con dimensiones variables.

XVI.3. Aceros inoxidables martensíticos

Los aceros inoxidables martensíticos son la primera rama de los aceros inoxidables, llamados simplemente al Cromo. Poseen un contenido de carbono entre 0,15 % y 1,2 %, y cromo entre 11,5 % y 18 %. Tienen estructura austenítica a elevada temperatura, que puede transformarse en martensita después de un tratamiento térmico de temple con enfriamiento en aire o aceite, elevando su dureza y resistencia al desgaste.

La resistencia a la corrosión de este tipo de aceros inoxidables está asociada a su contenido de cromo y a su microestructura. Las aleaciones de mayor contenido de carbono exhiben una menor resistencia a la corrosión en condición de temple y revenido, debido a la mayor susceptibilidad a la precipitación de carburos de cromo que presentan estos materiales.

En términos generales se puede decir que los aceros inoxidables martensíticos presentan menor resistencia a la corrosión que las demás familias de aceros inoxidables, pero tienen resistencia mecánica elevada. Algunas aleaciones pueden ser tratadas térmicamente para alcanzar valores de resistencia superiores a 1400 MPa.

Son magnéticos, pueden trabajarse en frío sin dificultad, especialmente con bajo contenido de carbono, pueden maquinarse satisfactoriamente, tienen buena tenacidad, se trabajan fácilmente en caliente y tiene una baja conductividad térmica.

XVI.3.1. Clasificación, propiedades y aplicaciones (según norma AISI)

AISI	Composición química	Propiedades	Usos
403	C: 0,15% máximo Cr: 11,5% a 13% Mn: 1% máximo Si: 0,5% máximo	Limite elástico y resistencia al impacto elevados. Resistente a la corrosión, alta resistencia mecánica y resistencia al impacto, fácilmente formable en frío	Construcción de los elementos de turbina delicados, como ser alabes y toberas
410	C: 0,15% máximo Cr: 11,5% a 13% Mn: 1% máximo Si: 1% máximo	Resistente a la corrosión, alta resistencia mecánica y resistencia al impacto, fácilmente formable en frío	Construcción de válvulas, alambre tejido para zaranda, ejes de bombas, bulones, gran variedad de elementos para industria química, del petróleo, etc.
414	C: 0,15% máximo Cr: 11,5% a 13,5% Ní: 1,25% a 2,5%	Resistencia a la corrosión. Mayor resistencia mecánica y al impacto	
416	C: 0,15% máximo Cr: 11,5% a 13% Mn: 1% máximo Si:0,5% máximo P: 0,04% máximo S: 0,18% a 0,35% Mo: 0,6% máximo	Baja resistencia a la corrosión	Tornillos, remaches, elementos forjados, accesorios de tuberías para aviones
418	C: 0,15% máximo Cr: 12% a 14% Mn: 1% máximo Si:1% máximo W: 2,5% a 3,5%	Resistencia mecánica a alta temperatura. Resistencia a la deformación a temperatura hasta 600º C igual o mayor a los aceros austeníticos. Fácil de mecanizar y puede soldarse sin dificultad	Para la construcción de vástagos de válvulas para vapor recalentados y tubos para los intercambiadores de calor
420	C: 0,25% a 0,35% Cr: 12% a 14% Mn: 1% máximo Si:1% máximo	Resistencia mecánica y ductilidad	Fabricación de cuchillos para mesa
420-F	C: 0,25% a 0,35% Cr: 12% a 14% Mn, Si: 1% máximo P, S o Se: 0,07% máx Mo o Zr: 0,6% máx	Similares a la precedente. Más fácil de mecanizar. Menor resistencia a la corrosión, impacto y conformabilidad en frío	
431	C: 0,20% máximo Cr: 15% a 17% Ní: 1,25% a 2,5%	Resistencia mecánica y al impacto similar a las del grado 414. Mayor resistencia a la corrosión y a la oxidación a altas temperaturas	
440-A	C: 0,6% a 0,75% Cr: 16% a 18% Mn: 1% máximo Si: 1% máximo Mo: 0,75% máximo	Dúctil para ser conformado en frío y adquiere dureza con el temple	Fabricación de cubiertos en general
440-B	C: 0,75% a 0,95% Cr: 16% a 18% Mn, Si: 1% máximo Mo: 0,75% máx	Más duro que el 440-A	Bolillas y anillos para rodamientos, instrumentos quirúrgicos y dentales, tijeras, cuchillos
440-C	C: 0,95% a 1,2% Cr: 16% a 18% Mn: 1% máximo Si: 1% máximo Mo: 0,75% máximo	Gran dureza, resistencia mecánica y resistencia a la corrosión, alta resistencia al desgaste por abrasión	Construcción de inyectores, elementos de válvulas, bolas para los molinos a bolas, asientos para las bombas de pozo de petróleo

440-F	C: 0,95% a 1,2% Cr: 16% a 18% Mn: 1% máximo Si: 1% máximo Se: 0,07% mínimo	Facilidad de ser mecanizado en máquinas herramienta automáticas	Fabricación de tornillos

XVI.3.2. Tratamientos térmicos de los aceros inoxidables martensíticos

El tratamiento térmico de los inoxidables martensíticos es esencialmente similar al de los aceros al C o de baja aleación, donde la máxima dureza depende principalmente del contenido de C. La principal diferencia metalúrgica es que el alto contenido de aleantes lentifica la transformación, y la templabilidad tan elevada hace que la máxima dureza se produzca por enfriamiento al aire, aún en el centro de espesores de aproximadamente 300 mm.

Los inoxidables martensíticos son más sensibles a las fallas de tratamiento térmico que los aceros al C o de baja aleación, de allí que los rechazos sean elevados. No existe ventaja en su uso debido a su elevado costo de material y de tratamiento térmico, a menos que se requiera una resistencia a la corrosión superior. Consecuentemente los procesos térmicos indicados están limitados a mantener la resistencia a la corrosión.

En la Fig. XVI.6 se muestra el efecto de los tratamientos térmicos sobre la dureza de aceros inoxidables martensíticos forjados.

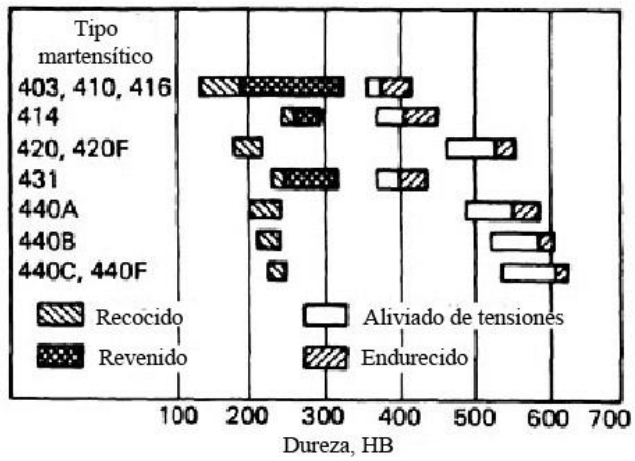

Fig. XVI.6: Efecto de los tratamientos térmicos sobre la dureza de aceros inoxidables martensíticos forjados

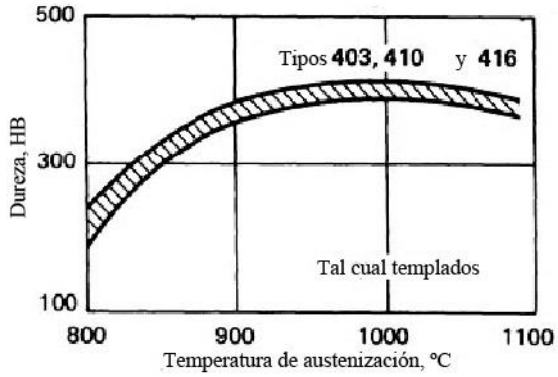

Fig. XVI.7: Efecto de la temperatura de austenización sobre la dureza tal cual templados. Las probetas corresponden a aceros inoxidables martensíticos de 0.15% max C.

XVI.3.2.1. Limpieza previa: Para evitar contaminación, todas las piezas y dispositivos deben estar perfectamente limpios antes de ser introducidos en el horno para el tratamiento térmico.

XVI.3.2.2. Precalentamiento: Para ser endurecidos, los aceros inoxidables martensíticos deben calentarse por encima del rango de transformación, a temperaturas de 930° C a 1060° C.

La conductividad térmica de los aceros inoxidables es sensiblemente inferior a la de aceros al C o de baja aleación, por lo tanto los altos gradientes térmicos con la consecuencia de elevadas tensiones, pueden provocar fisuras en las piezas si el calentamiento es rápido. Para evitar estos problemas usualmente se recomienda el precalentamiento a 760-790º C con el tiempo suficiente para asegurar que todas las porciones alcancen la misma temperatura. Las piezas con grandes espesores a veces deben precalentarse a 540º C antes de llevarse a 790º C. Las clases de menores % de C requieren menos precalentamiento que los tipos con elevado % de C.

XVI.3.2.3. Austenizado: La temperatura, tiempos de calentamiento y medios de temple se indican en la Tabla XVI.5. Cuando se desee la máxima resistencia a la corrosión y mecánica, el acero debería ser austenizado a la mayor temperatura del rango, tal como se observa en la Fig. XVI.7. Las probetas corresponden a aceros inoxidables martensíticos de 0.15% max C. Para aleaciones revenidas por encima de 560° C, se recomienda la austenización en el rango bajo porque favorece la ductilidad y el impacto.

La dureza de temple de los diferentes grados martensíticos, se incrementa con el incremento de la

temperatura de austenización hasta los 980° C; después de esto decrece debido a la austenita retenida y ocasionalmente por la formación de delta ferrita.

En la Fig. XVI.8 se grafica el efecto de la temperatura de austenización sobre la dureza y resistencia al impacto de aceros inoxidables martensíticos, para probetas revenidas a 480 °C durante 4 h.

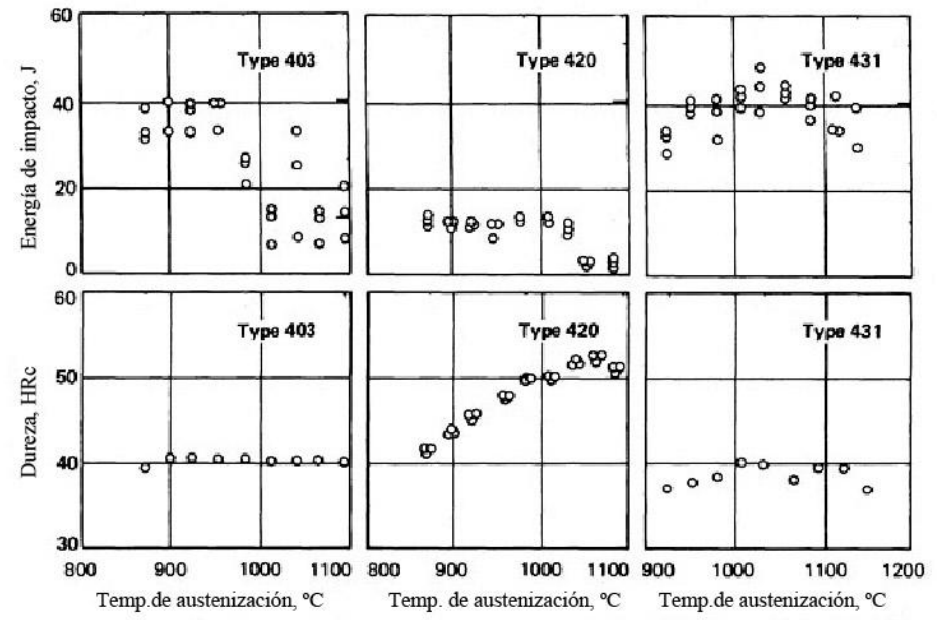

Fig. XVI.8: Efecto de la temperatura de austenización sobre la dureza y resistencia al impacto de aceros inoxidables martensíticos. Probetas revenidas a 480 °C por 4 h.

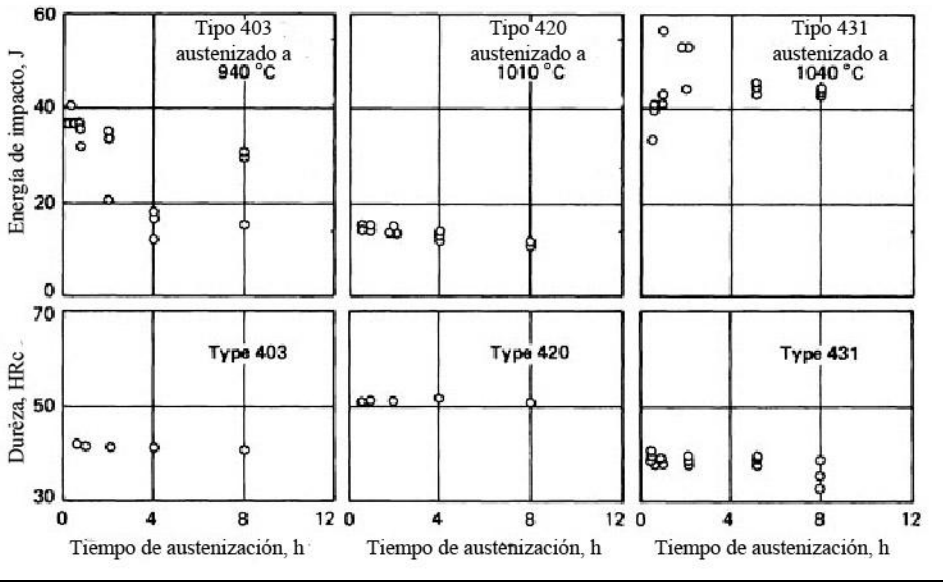

Fig. XVI.9: Efecto del tiempo de austenización sobre la dureza y resistencia al impacto de aceros inoxidables martensíticos forjados, en muestras revenidas a 480 °C durante 4 h.

XVI.3.2.4. Tiempo de calentamiento: Los tiempos empleados en el endurecimiento de los aceros inoxidables martensíticos representan un compromiso entre el logro de la máxima disolución de los carburos de hierro y cromo para la máxima resistencia mecánica y a la corrosión, y evitar la descarburación, excesivo agrandamiento de grano, austenita retenida, fragilidad y fisuras de temple. Para espesores de 12 mm. o menores, se recomienda un tiempo de 30 a 60 minutos de calentamiento. Para las demás piezas se debe aumentar 30 minutos por cada 25 mm. adicionales de espesor. Sin embargo los tiempos de calentamiento deberían ser dobles de los indicados si las piezas fueron previamente recocidas isotérmicamente. En la Fig. XVI.9 se muestra el efecto del tiempo de austenización sobre la dureza y resistencia al impacto de aceros inoxidables martensíticos forjados, en muestras revenidas a 480 °C durante 4 h.

XVI.3.2.5. Temple: A causa de su alta templabilidad, todos los aceros inoxidables martensíticos pueden ser templados en aire o en aceite. El temple en aceite garantiza la máxima resistencia a la corrosión y tenacidad en estas aleaciones. Con temple en aire se puede disminuir la resistencia a la corrosión y la tenacidad especialmente en los tipos 414, 420, 431 y 440. En estos aceros pueden precipitar carburos en los bordes de

grano cuando se enfrían lentamente piezas de espesores grandes, dentro de un rango de temperatura de 870 a 540º C.

Aunque es preferible el temple en aceite, puede requerirse el temple en aire para espesores grandes o complejos donde resulta difícil prevenir fisuras de temple y distorsión. El martemplado es particularmente fácil de efectuar a causa de su gran templabililidad.

Tabla XVI.5: Procedimientos de temple y revenido de aceros inoxidables martensíticos, niveles de resistencia y durezas alcanzadas

Tipo	**Temp. de austenización, ºC**	**Medio de temple**	**Temp de revenido, ºC**		**Resistencia a la tracción (MPa)**	**HRc**
			Min	**Máx**		
403, 410	930 a 1010	Aire o aceite	560 200	600 370	760 a 960 1100 a 1500	25 a 31 38 a 47
414	930 a 1050	Aire o aceite	600 230	650 370	760 a 960 1100 a 1500	25 a 31 38 a 49
416, 416Se	930 a 1010	aceite	560 230	600 370	760 a 960 1100 a 1500	25 a 31 35 a 45
420	980 a 1065	Aire o aceite	200	370	1550 a 1930	48 a 56

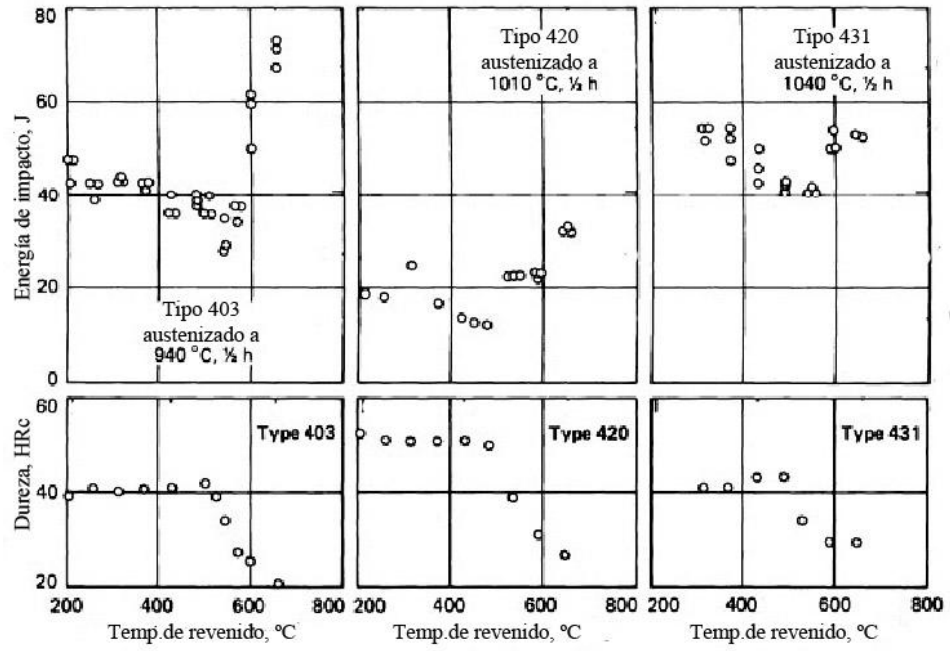

Fig. XVI.10: Efecto de la temperatura de revenido sobre la dureza y Resistencia al impacto de aceros inoxidables martensíticos forjados.

XVI.3.2.6. Austenita retenida: Los grados martensíticos de más alto porcentaje de carbono, tal como el 440 o el 441, retienen fácilmente gran cantidad de austenita sin transformar; encontrándose hasta el 30 % en volumen. Una porción de ella puede ser transformada por un tratamiento subcero a -70º C, inmediatamente después del temple. Para obtener la máxima transformación de la austenita retenida, son necesarios 2 o más ciclos de revenido.

El revenido a temperaturas intermedias se realiza para modificar las propiedades mecánicas y estructurales. Las temperaturas de revenido más frecuentemente empleadas para lograr la dureza u otra propiedad mecánica, están incluidas en la Tabla XVI.5. En la Fig. XVI.10 se muestra el efecto de la temperatura de revenido sobre la dureza y resistencia al impacto de aceros inoxidables martensíticos forjados.

En la Fig. XVI.11 se presenta el efecto de las temperaturas de austenización y revenido sobre las propiedades mecánicas de un acero inoxidable martensítico tipo 410. El acero fue austenizado durante 30 min; templado en aceite a 65 - 95 °C; doble alivio de tensiones a 175°C por 15 min y templado en agua; revenido durante 2 h. La Fig. XVI.11 (a) corresponde a temple desde 925 °C; la Fig. XVI.11(b), temple desde 1010 °C.

El efecto de la temperatura de revenido sobre las características de corrosión bajo tensión, de dos aceros inoxidables martensíticos forjados, sometidos a altas tensiones, se muestra en la Fig. XVI.12. Los datos corresponden a un nivel de tensiones de 350 MPa, en ensayos en gabinete de niebla salina.

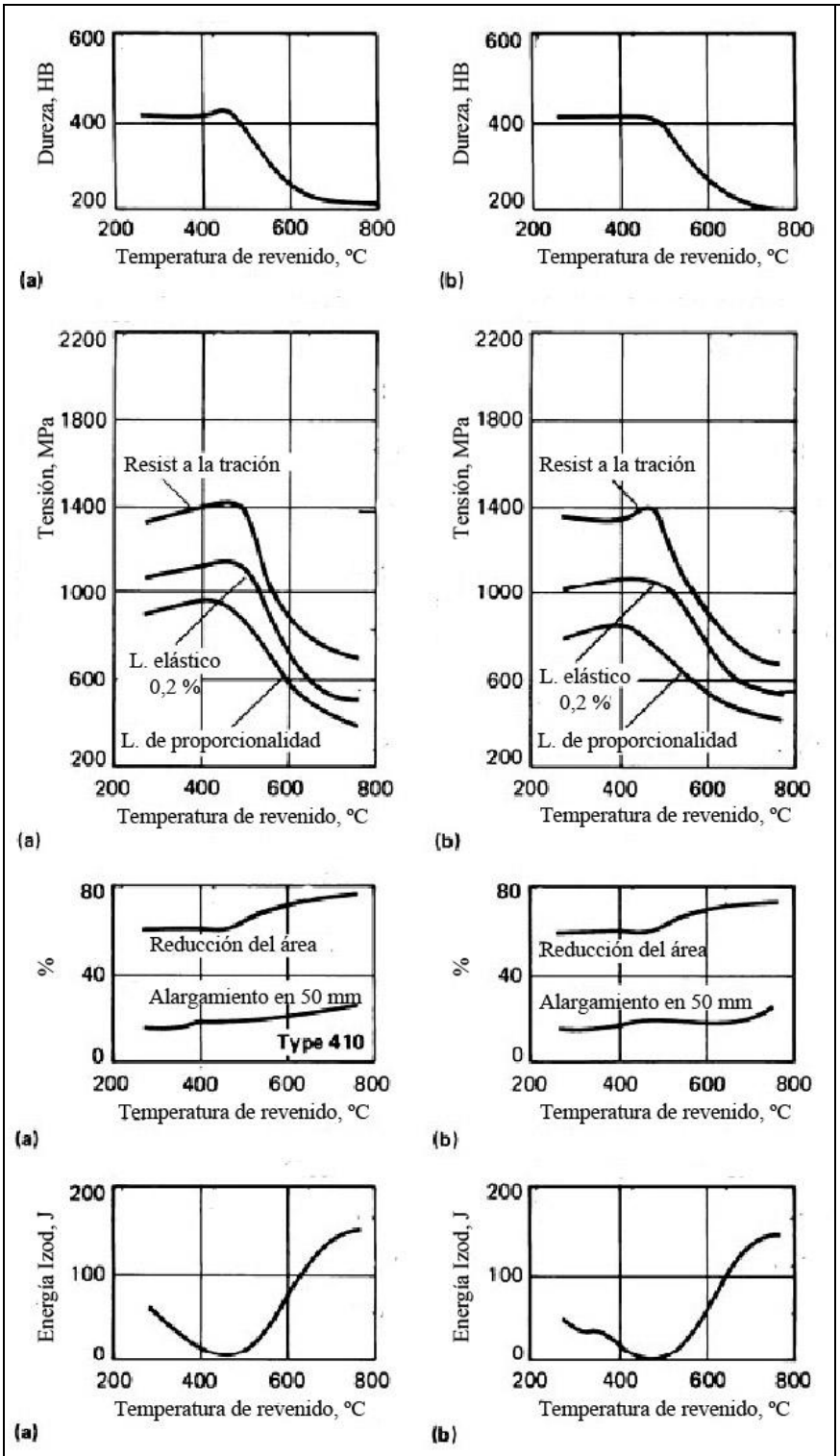

Fig. XVI.11: Efecto de las temperaturas de austenización y revenido sobre las propiedades mecánicas de un acero inoxidable martensítico tipo 410. El acero fue austenizado durante 30 min; templado en aceite a 65 - 95 °C; doble alivio de tensiones a 175°C por 15 min y templado en agua; revenido durante 2 h
(a) Templado desde 925 °C .
(b) Templado desde 1010 °C

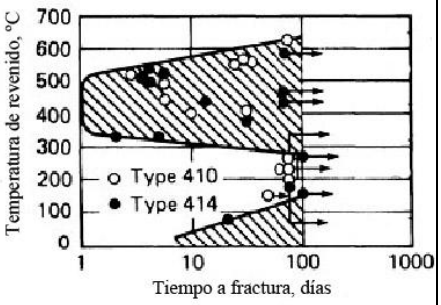

Fig. XVI.12: Efecto de la temperatura de revenido sobre las características de corrosión bajo tensión, de dos aceros inoxidables martensíticos forjados, sometidos a altas tensiones. Datos correspondientes a un nivel de tensiones de 350 MPa para ensayos en gabinete de niebla salina.

XVI.3.2.7. Recocido

En estos aceros pueden emplearse varios tratamientos de recocido.

El *recocido total* es costoso y prolongado; se aplica solamente antes de un conformado en frío severo. El *recocido isotérmico* se recomienda para alcanzar el máximo ablandamiento. Todos los recocidos provocan la formación de carburos gruesos lo que redunda en un incremento de la temperatura de austenización cuando se quiere disolverlos antes de templar. El *recocido subcrítico* se recomienda para todas las aplicaciones que no requieran el máximo ablandamiento.

XVI.4. Aceros inoxidables endurecibles por precipitación

Los aceros inoxidables endurecibles por precipitación o PH (Precipitation Hardening) son aleaciones de hierro, carbono, cromo y níquel que se caracterizan por la resistencia obtenida a partir de un tratamiento térmico de envejecimiento.

El primer acero inoxidable austenítico PH comercial, fue el denominado Stainless W. Se comenzó a fabricar en el año 1946. Desde entonces, se han desarrollado muchos aceros PH, en parte debido a los requerimientos exigidos por las industrias aeronáutica y aeroespacial, que demandaban aceros con una buena relación entre peso y alta resistencia a la corrosión.

Pueden ser martensíticos, austeníticos o intermedios entre ambos, dependiendo de la proporción Cr/Ni. Lo que realmente los distingue es la adición de ciertos elementos como Al, Ti, Mo y Cu, que dan lugar a la formación de compuestos intermetálicos de manera controlada. Así, el endurecimiento por medio de estos compuestos se puede realizar por precipitación desde una matriz martensítica.

Para ello se somete al material a un tratamiento de solubilización a una temperatura de unos 1050º C con posterior enfriamiento al aire, dando lugar a una matriz martensítica sobresaturada. A continuación, se envejece el acero a una temperatura comprendida entre 455º C y 565º C, donde precipitan los compuestos intermetálicos endurecedores. El endurecimiento se logrará si se obtienen los precipitados en el interior de los granos homogéneamente distribuidos y que cada uno constituya un obstáculo eficaz para el deslizamiento de las dislocaciones.

Como aspecto negativo debe destacarse que estas aleaciones se trabajan mal en frío. Cuando se parte de una matriz austenítica sobresaturada, después de la precipitación por envejecimiento se obtienen menores resistencias mecánicas pero una considerable mejoría de la ductilidad.

Los aceros inoxidables endurecibles por precipitación contienen cantidades suficientes de Cr y Ni, que les confieren las propiedades de los austeníticos y de los martensíticos. Al igual que los martensíticos, poseen la capacidad de adquirir alta resistencia mediante tratamientos térmicos, y al igual que los austeníticos poseen una alta resistencia a la corrosión. Uno de los aceros inoxidables PH más populares es el acero 17-4PH. Esta designación se debe al contenido de 17% de Cr y 4% de Ni. Además contiene 4% de Cu y 0,3% de Nb. También se conoce como un acero de grado 630.

Se pueden clasificar en función de su estructura en estado de recocido, y del comportamiento resultante después del tratamiento térmico de envejecimiento, en austeníticos, martensíticos y semiaustenníticos. Se encuentran patentados y normalmente se les designa por su nombre comercial.

XVI.4.1. Propiedades

Además de su gran inoxidabilidad a temperatura ambiente y a elevadas temperaturas, las principales propiedades de este grupo de aceros son:

- Muy alta resistencia a la tracción en caliente, lo que permite emplearlos con éxito en la fabricación de álabes de turbinas y otras piezas de motores de aviación.
- Elevada dureza, resistencia mecánica y límite de elasticidad a temperatura ambiente.

El límite elástico de los aceros inoxidables PH varía entre 515 y 1415 MPa, y la resistencia mecánica entre 860 y 1520 MPa. Cuando son trabajados en frío antes de los tratamientos de envejecimiento, se consiguen aún mayores resistencias. Sus propiedades se basan en los tratamientos térmicos a los que son sometidos.

XVI.4.2. Tratamientos térmicos de los aceros inoxidables endurecibles por precipitación

Debe prestarse atención a:

- La limpieza previa al tratamiento térmico
- La atmósfera del horno
- Los ciclos tiempo-temperatura

- El efecto de las variaciones en los ciclos
- La limpieza superficial luego del tratamiento

Los procedimientos más recomendados para recocido total, austenización, enfriamientos y tratamiento de precipitación, se encuentran en la Tabla 15 (pag. 1734) del ASM Handbook, Vol 4.

Los aceros más empleados son:

17-4 PH (UNS S17400) es un acero endurecible por precipitación que tiene estructura esencialmente martensítica, y limitada conformabilidad cuando es provisto en la condición de solubilizado (condición A). En ese caso debe tenerse cuidado en su utilización, debido a su baja ductilidad. Luego de la fabricación se realiza un endurecimiento en el rango de 480 a 620 °C, que también mejora la tenacidad.

17-7 PH (UNS S17700) normalmente es provisto en condición de solubilizado, siendo blando y conformable. El tratamiento térmico se logra por procedimientos de endurecimiento por transformación o por "refrigeración", según las posibilidades existentes. Las piezas que son fuertemente deformadas (condición B) deben tratarse térmicamente para evitar la formación de puntos blandos.

Cuando se provee en la condición laminado en frío (condición C), la transformación se logra durante el laminado, y el tratamiento térmico se reduce a una sola etapa a 480 °C durante 1 h. Con este proceso se incrementa la resistencia mecánica y a la corrosión, y disminuyen la ductilidad y conformabilidad.

XVI.4.2.1. Variaciones en los ciclos de tratamiento térmico: Una de las principales ventajas de estos materiales es la versatilidad. Si bien algunos tratamientos se han normalizado, como se indica en la Tabla XV.6 , hay aplicaciones donde es recomendable salirse de las normas. La serie de curvas de las Fig. XVI.13, 14, 15, 16 y 17 muestran cómo estas desviaciones afectan las propiedades mecánicas.

Tabla XVI.6: Tratamientos normalizados para los tipos de aceros más usados.

Tipos PH 17-4 y PH 15-5	**Tipo PH 17-7**
% C: 0,07 % Mn: 1,00 % Cr: 15 % Ni: 3 - 5 % Cu: 3 % Nb:0,15-0,45 % Ta: 0,15-0,45	% C 0,09 % Cr 17,0 % Ni 7,0 % Al 1,0
TRATAMIENTO TERMICO SIMPLE Solución a 1040º C Temple para obtener martensita Revenido de precipitación (480 – 620º C) HRc 25 - 40 Resistencia a la tracción: 790 - 1300 MPa	TRATAMIENTO TERMICO DOBLE Solución a 1040º C Temple, queda austenítico 3 diferentes procedimientos: a) acondicionamiento a760º C (precipitan carburos) y se desbalancea la composición; la austenita transforma en martensita a 15º C b) acondicionado a 925º C (precipitan pocos carburos y transforma en martensita a -75° C c) Severo trabajo en frío, transforma en martensita TT final: revenido para precipitación a 480 a 620º C HRc 38 - 41 Resistencia a la tracción: 1170- 1270 MPa
Tipos de precipitados: Ni_3Nb-Ni_3Al-Cu_3Mn-Ni_3Ta	

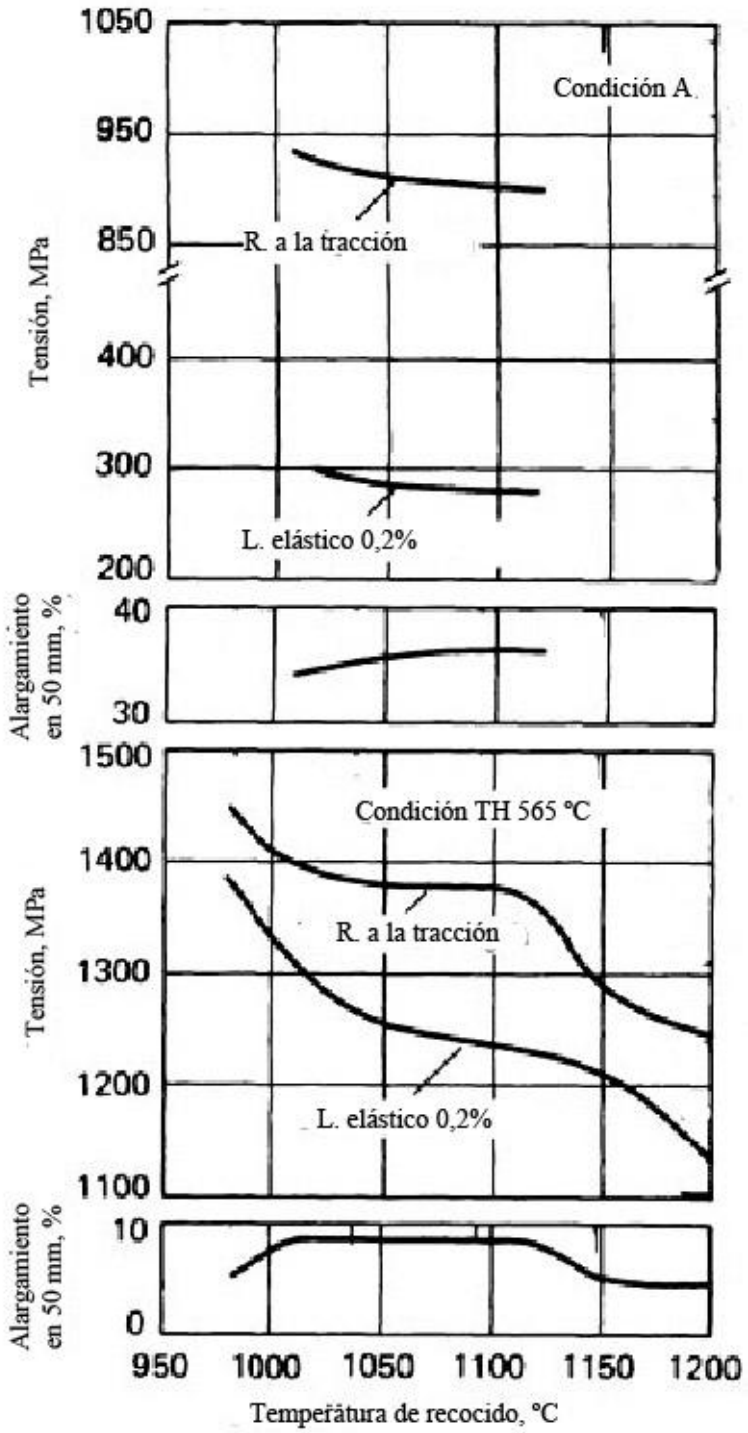

Fig. XVI.13: Efecto de las variaciones en la temperatura de recocido sobre las propiedades mecánicas de chapas, flejes y planchuelas de acero 17-7 PH

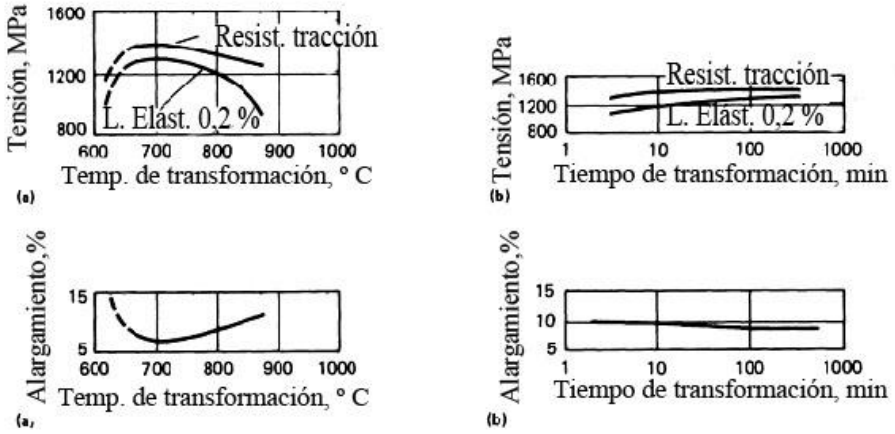

Fig. XVI.14: Efecto de la temperatura y tiempo del tratamiento de precipitación sobre las propiedades mecánicas de chapas, flejes y planchuelas de acero 17-7 PH.
(a) Calentado durante 90 min; enfriado a 15 °C; precipitado a 565 °C.
(b) Calentado a 760 °C; precipitado a 565 °C durante 90 min

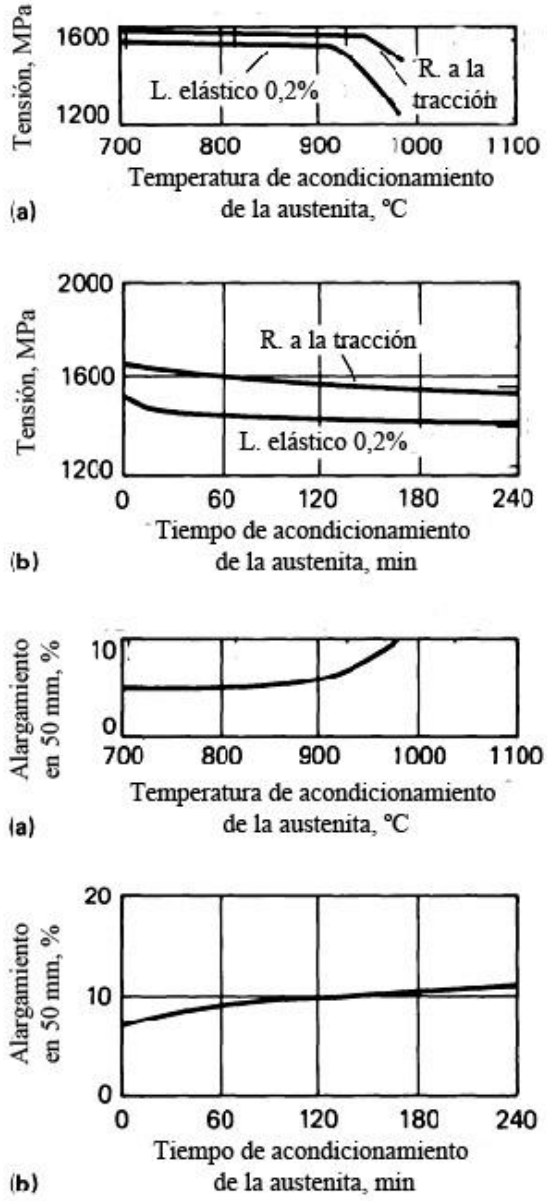

Fig. XVI.15: Efecto de la temperatura y tiempo de acondicionamiento de la austenita sobre las propiedades mecánicas de chapas, flejes y planchuelas de acero PH 17-7 (a) Calentado durante 10 min; enfriado al aire, luego enfriado en líquido a -75 °C durante 8 h; endurecido a 510 °C durante 1 h. (b) Calentado a 955 °C; enfriado al aire, luego enfriado en líquido a -75 °C durante 8 h; endurecido a 510 °C durante 1 h.

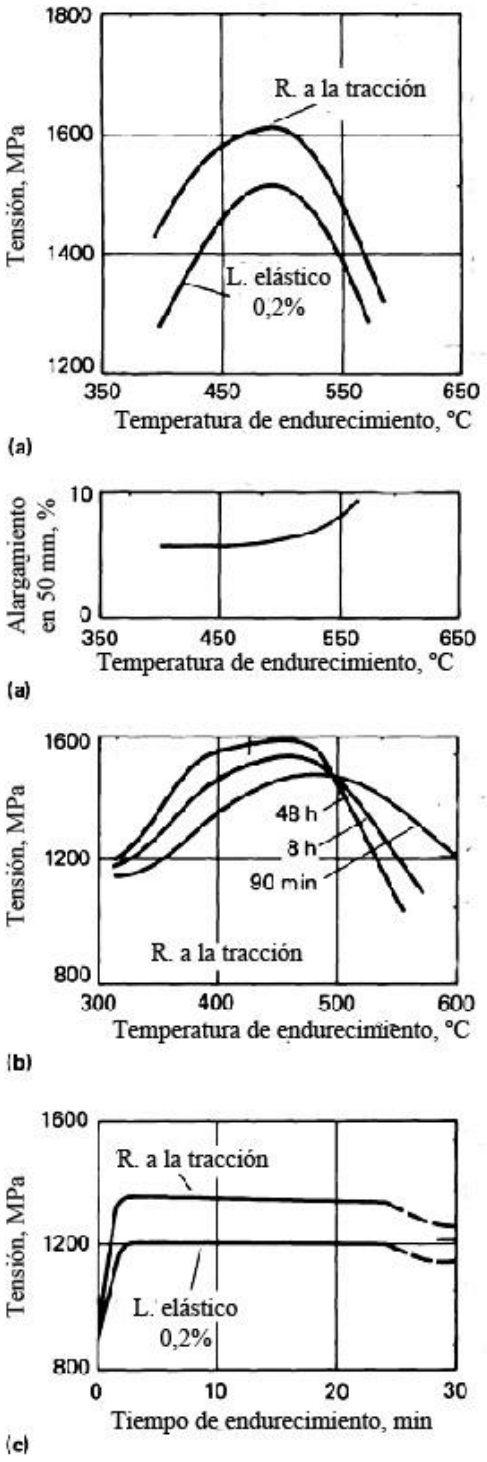

Fig. XVI.16: Efecto de la temperatura y tiempo de endurecimiento sobre las propiedades mecánicas de chapas, flejes y planchuelas de acero PH 17-7. (a) Calentado a 955 °C durante 10 min; enfriado al aire, luego en líquido a -75 °C durante 8 h; endurecido durante 1 h. (b) Calentado a 760 °C durante 90 min; enfriado al aire a temperatura ambiente; templado en agua a 15 °C; endurecido como se indicó. No hay disponibles datos de alargamiento. (c) Calentado a 760 °C durante 90 min; enfriado al aire a temperatura ambiente; templado en agua a 15 °C; endurecido a 565 °C. No hay disponibles datos de alargamiento.

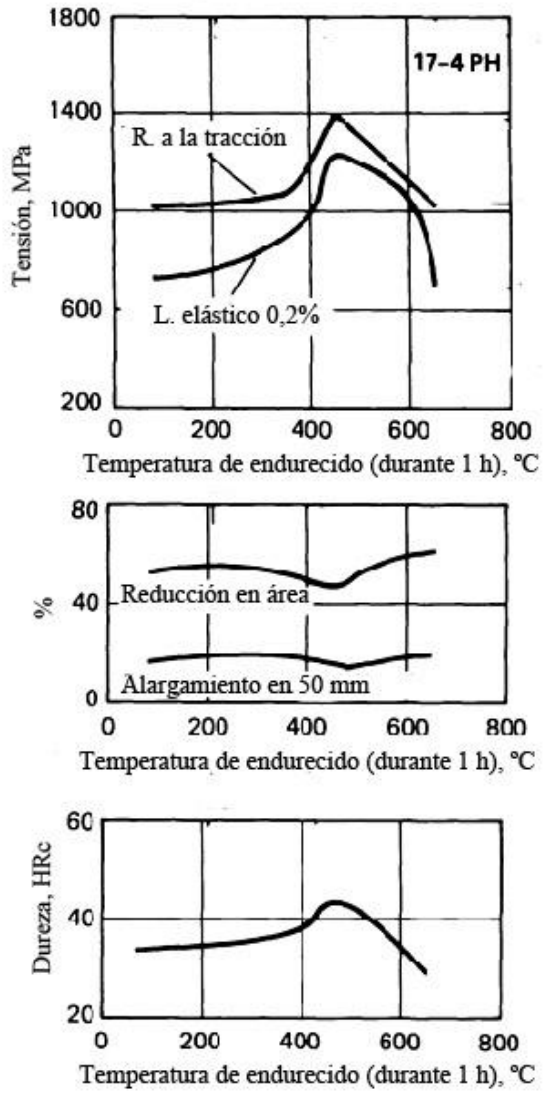

Fig. XVI.17 Efecto de la temperatura de precipitación sobre las propiedades a temperatura ambiente de acero PH 17-4 solubilizado a 1040° C durante 30 min, enfriado al aire. Los datos son valores promedio para barras de 25 a 89 mm de diámetro de cuatro coladas.

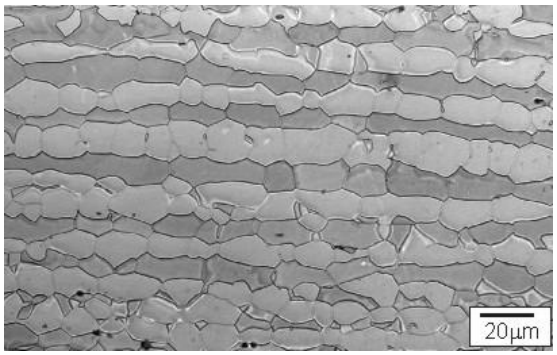

Fig. XVI.18: Microestructura de una acero inoxidable dúplex luego del laminado.

XVI.5. Aceros inoxidables dúplex (dual phase)

Son aleaciones bifásicas austenítico-ferríticas, cuyo límite elástico duplica al de los aceros austeníticos y una resistencia a la corrosión similar. Esto posibilita soportar mayores esfuerzos en el trabajo o una disminución del tamaño de los componentes, lo que implica un importante ahorro de material. Poseen una excelente tenacidad, superior a los aceros ferríticos. En la Fig. XVI.18 se observa la estructura bifásica de un acero inoxidable de bajo carbono, donde la parte oscura corresponde a la ferrita y la clara a la austenita, luego del laminado.

XVI.5.1. Clasificación de los aceros dúplex

- Económico UNS S32304 (23Cr-4Ni-0.1N): exponente de la primera generación, es un material con muchas aplicaciones.

- Grado estándar UNS S31803 (22Cr-5Ni-3Mo-0.17N): es el dúplex más extendido. Su resistencia a la corrosión se encuentra entre la del AISI 316 (acero inoxidable austenítico al Molibdeno) y la de los superausteníticos con 5-6 % de Molibdeno.

- Grado superdúplex UNS S 32550 (25Cr-7Ni-3.7Mo-0.27N): exponente de la tercera generación especialmente diseñado para aplicaciones marinas.

Los aceros como SAF 2205, AF 22, DP 3 y Ferralium alloy 255, son aleados con 0.15 a 0.20% N. Esto minimiza la segregación de los elementos entre la ferrita y la austenita, por lo tanto mejoran la resistencia a la corrosión en partes soldadas, comparado esto con el acero tipo 329. La adición de N además incrementa la formación de austenita durante la colada y soldadura, y previene la estabilización de ferrita de alta temperatura, durante los enfriamientos rápidos. En la Tabla XVI.6 se listan las temperaturas de recocido para algunos aceros inoxidables dúplex.

Tabla XVI.6 Temperaturas de recocido recomendadas para algunos aceros inoxidables dúplex

Designación UNS No.	Temperatura de recocido [(a)] °C
S32900 329	925-955
S32950 7 Mo Plus	995-1025
S31500 3RE60	975-1025
S31803 SAF 2205	1020-1100
S31260 DP-3	1065-1175
S32550 Ferralium 255	1065-1175

[(a)] Seguido de enfriamiento rápido

XVI.5.2. Propiedades mecánicas

La Tabla XVI.7. muestra las propiedades en tracción de los tres tipos de dúplex (económicos, estándar y superdúplex), y también de los austeníticos y superausteníticos.

Tabla XVI.7: Propiedades monotónicas de aceros inoxidables

Tipo	**Límite elástico 0.2%, (MPa)**	**Resistencia Máxima, (MPa)**	**Alargamiento a fractura (%)**
Austenítico (304L)	210	520	40
Superausteníticos(S31254)	320	600	40
DSS Económico (S32304)	400	600	25
DSS Estándar (S31803)	480	680	25
DSS Superduplex (S32550)	550	760	25

XVI.5.3. Aplicaciones

Se utilizan en la industria del aceite, papel, gas y química.

En la actualidad se están aplicando en arquitectura por su gran resistencia mecánica, a la corrosión y por lo liviano que resulta. Otro motivo de aplicación es que son libres de mantenimiento (no se necesita pintar), por ello se los utiliza en puentes, botes de navegación, plataformas marinas. Por otro lado las barras de hormigón armado de aceros austeníticos, muchas veces se reemplazan por DSS ya que la menor expansión térmica lleva a un mejor acople del hormigón.

Otros usos de estos aceros están surgiendo en equipos industriales como autoclaves, máquinas de lavado y centrífugas, donde la resistencia mecánica y a la corrosión no son tan importantes como la maquinabilidad.