

## **ACEROS INOXIDABLES**

ING. SERGIO G. LAUFGANG

**TERMO SOLDEX S.A**

TRATAMIENTO TERMICO DE SOLDADURA – PRUEBA HIDRÁULICA DE GASODUCTOS

# ACEROS INOXIDABLES

## 1. INTRODUCCIÓN.

Una buena manera de comenzar sería preguntarse ¿por qué los Aceros Inoxidables son inoxidable? Los Aceros Inoxidables son inoxidable por que tienen Cromo, en una cantidad superior a 10%, hasta valores del orden de 30%.

El Cr es un metal reactivo y se combina con el Oxígeno del aire o en cualquier otra condición oxidante para formar una película sobre el acero inoxidable que lo aísla del medio agresivo.

Se cree, aunque no por todos los investigadores, que la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable es el resultado de la presencia de esta fina, densa (no porosa), continua, insoluble, adherente, tenaz, autoregenerante e impermeable capa de óxido hidratado de Cromo en la superficie de estos aceros que impide, una vez formada esta, el contacto del acero con el medio oxidante.

La composición de esta película varía con el tipo de acero y con los diferentes tratamientos tales como laminado, decapado (pickling) o tratamiento térmico.

A esta situación se la denomina pasivación y la película formada es inerte frente a las condiciones oxidantes de la atmósfera terrestre.

Esta película es transparente y brillante y confiere al acero inoxidable la habilidad de retener su apariencia “inmaculada” (stainless en Inglés), agradable a la vista.

El rango de condiciones bajo las cuales un Acero Inoxidable desarrolla Pasivación puede ser amplio o reducido, la pasividad puede ser destruida por pequeños cambios de las condiciones. En condiciones favorables a la pasivación el metal adquiere potenciales de disolución cercanos al de los metales nobles. Cuando la pasividad se destruye el Potencial se acerca al del hierro.

Hay un número importante de distintos Aceros Inoxidables. Su resistencia a la corrosión, propiedades mecánicas y costo varía en un rango muy amplio, por esa razón es importante especificar el acero inoxidable más apropiado para una dada aplicación. El costo se eleva entre 5 y 10 veces el de un acero al carbono.

Conviene tener en cuenta que el término “Inoxidable” es un término genérico que involucra en UNS\* a más de 130 composiciones químicas diferentes de aceros y/o aleaciones inoxidable.

Pueden estar aleados además, con Cu, Al, Si, Ni, Mo, Nb, Ti que también aumentan su resistencia a la corrosión, directa o indirectamente, en condiciones específicas.

Necesitamos un ambiente oxidante para formar la película de óxido de cromo. Con 10% de Cr, que es la mínima proporción, la atmósfera terrestre es capaz de formar una película protectora para un ambiente poco agresivo como puede ser el interior de una vivienda, pero con el tiempo si este acero presta servicio a la intemperie acaba corroyéndose.

Aun cuando su resistencia a la corrosión es la propiedad más apreciada no debemos olvidar otras propiedades. Algunos aceros se autotemplan, otros no toman temple, resisten las altas temperaturas, se mecanizan con facilidad, tienen capacidad de deformarse plásticamente o son soldables.

Su aplicación se extiende desde usos arquitectónicos hasta la utilización en equipos de la industria química con condiciones extremas de servicio.

\*“Unified Numbering System” desarrollado por ASTM, SAE y otros para asignar a cada aleación metálica un número (no una especificación), relacionado con su Composición Química. El sistema AISI existente está incorporado en esta nueva numeración. Ver ASTM E527.

Al seleccionar un acero inoxidable debe evitarse seguir el mismo sistema utilizado con los aceros al Carbono. Resultados satisfactorios de un acero dado en condiciones específicas de temperatura, PH, concentración del medio agresivo, etc, no pueden extrapolarse a otras condiciones aunque parezcan similares.

El método idóneo de selección se basa en la experiencia ya sea del usuario como la del fabricante del acero inoxidable.

A medida que aumenta el riesgo de corrosión es necesario aumentar la concentración de Cr aunque debe recordarse que el aumento de resistencia a la corrosión no tiene por que ser proporcional. Sin embargo con alrededor de 18% de Cr el acero esta en condiciones de soportar las mas rigurosas condiciones Atmosféricas. (el acero 18-8, AISI 304 o UNS S30400 con 18% de Cr y 8% de Ni es capaz de soportar tales condiciones mas de 12 años)

Los aceros Inoxidables no son atacados por el ácido nítrico u otros ácidos oxidantes, sino mas bien estos ácidos facilitan la formación de la película protectora.

Por otra parte estos aceros no resisten la presencia de ácidos reductores como el ácido clorhídrico o fluorhídrico, y son atacados por las sales de ellos (cloruros, fluoruros, bromuros y yoduros).

En la industria se utilizan substancia limpiadoras a base de cloruros para mejorar el aspecto de los aceros inoxidables. Deben tomarse precauciones por que 40 minutos es el tiempo máximo de exposición a estos agentes.

El ácido sulfúrico marca la frontera entre ácidos oxidantes y reductores ya que en algunos casos es inofensivo y en otros ataca fuertemente.

El efecto de los ácidos como el de las sales varía con las condiciones de servicio, concentración del agente corrosivo y con el tipo de acero.

Para obtener la máxima resistencia a la corrosión es recomendable mantenerlos limpios y pulidos para preservar a la superficie de sustancias extrañas que pudieran albergarse en los poros o irregularidades de la superficie.

En el caso de aceros inoxidables templables (Martensíticos), la máxima resistencia a la corrosión se obtiene luego de un temple completo. Todos los aceros inoxidables deben pasivarse.

Debe recordarse que cuando los Aceros Inoxidables sufren corrosión esta no es uniforme como en el caso de los aceros al carbono, sino localizada, por picaduras (Pitting) o fisuras por Corrosión bajo Tensión. Debido a ello no puede prevenirse por el agregado de sobre espesores sino que debe evitarse la corrosión misma por medio de un conocimiento profundo del medio corrosivo y el Acero utilizado.

## 1.1 CLASIFICACION DE LOS ACEROS INOXIDABLES

**L**os aceros inoxidables se dividen de acuerdo con su Microestructura en cinco grupos:

1. FERRÍTICOS
2. MARTENSITICOS
3. AUSTENITICOS
4. DUPLEX
5. ENDURECIDOS POR PRECIPITACIÓN

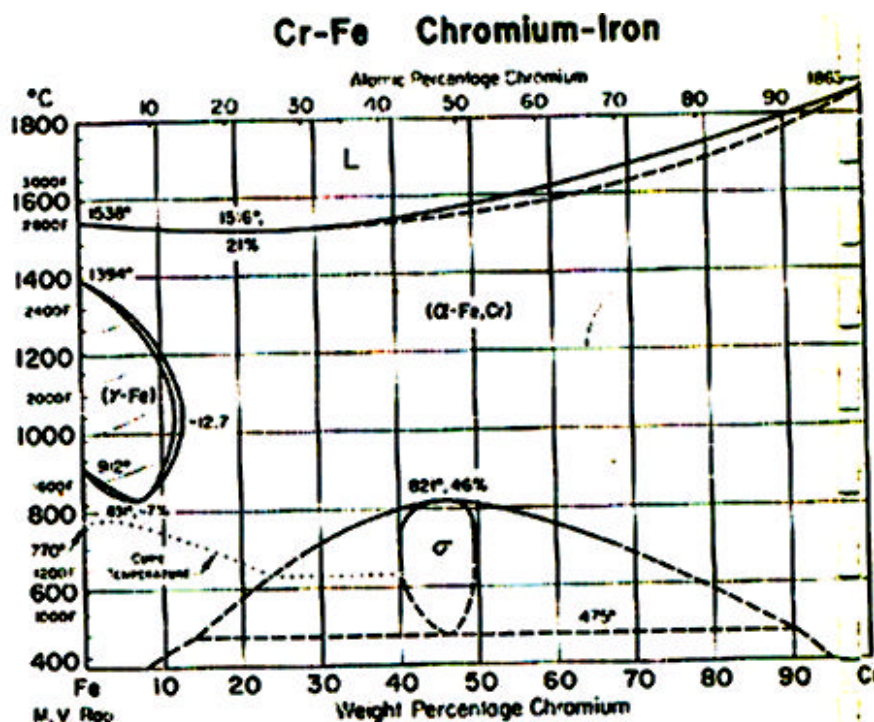
## 2. ACEROS INOXIDABLES AL CROMO. SERIE 400 .FERRITICOS Y MARTENSITICOS.

Esta familia de Aceros Inoxidables debe su existencia a la adición solo de Cr y son llamados Aceros Inoxidables al Cromo o serie 400. Por tener menos elementos de aleación que los Austeníticos su costo es de aproximadamente el 70% del costo de un acero Austenítico.

Metalúrgicamente el Cr es un formador de Ferrita (Ferrita es la estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo del Hierro / Acero al C, a temperatura ambiente) y composiciones con 11 a 14 % Cr pueden ser tratadas térmicamente (por ejemplo tipos 410, 420, 440). Calentando estas aleaciones aproximadamente a 980°C se Austenizarán y luego, debido a la alta templabilidad que le confieren los elementos de aleación, con enfriamiento aun muy lentos tales como enfriamiento al aire se transformarán en Martensita.

Dentro de la familia de los aceros Inoxidables con solo Cromo (serie 400) podemos encontrar dos grupos, los aceros Ferríticos y los Martensíticos.

El Acero Inoxidable mas simple contiene solamente Hierro y Cromo. La Fig.1 muestra el diagrama de equilibrio estable Fe-Cr, una manera apropiada de introducirnos en la Metalurgia de esta aleación.



**Fig. 1. Diagrama de equilibrio Estable de la aleación Hierro-Cromo**

Un hecho interesante del diagrama es que aleaciones con más de  $\approx 12,7\%$  de Cr, tienen la estructura Cúbica centrada en el Cuerpo (b.c.c) del Fe alfa desde temperatura ambiente hasta el punto de fusión. Al no atravesar durante el calentamiento el campo Austenítico, cúbico centrado en las caras (f.c.c) del Fe gamma, no pueden austenizarse y templarse para formar Martensita. Los aceros inoxidable al Cr con contenidos de alrededor de 12% de Cr o más son llamados Aceros Inoxidable Ferríticos. Debe recordarse que en estos aceros debe limitarse el %C para que no se transformen, como veremos en Aceros Inoxidable Martensíticos.

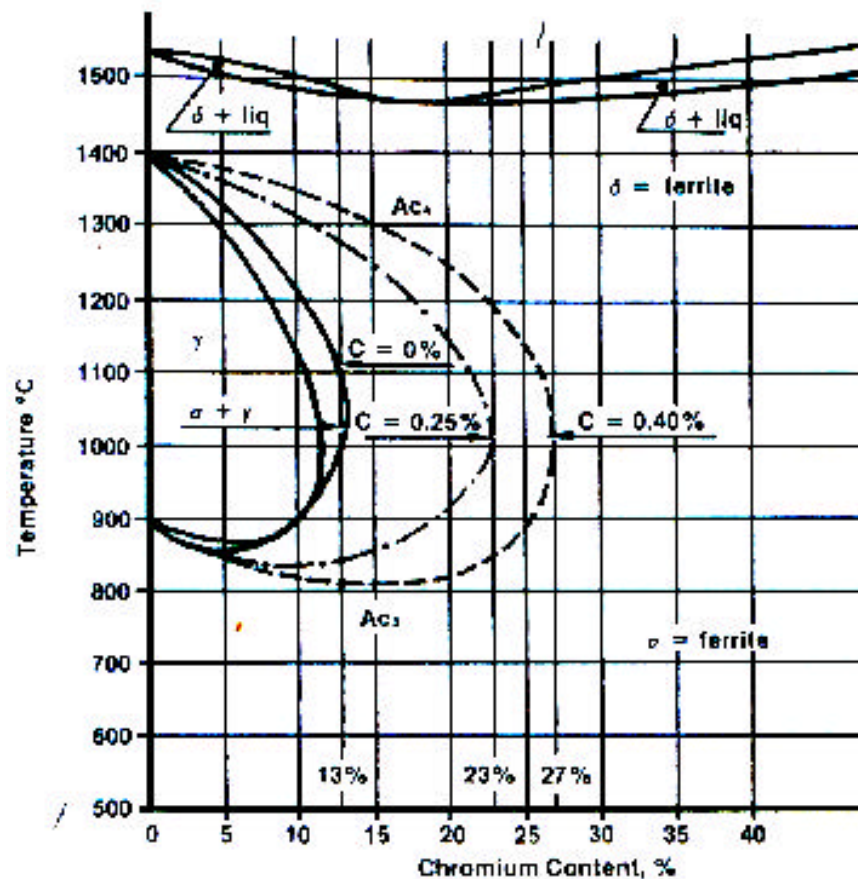


Fig.2 Influencia del carbono ampliando el bucle Gamma

En la Fig.2 se observa que el bucle gamma, se expande a la derecha por el simple agregado de carbono. De esta manera podemos conseguir aleaciones hasta con 17% de Cr, que a su vez puedan Austenizarse y templarse aun con bajas velocidades de enfriamiento para obtener Martensita. Este grupo de Aceros Inoxidable se denominan Martensíticos y además de Cr deben poseer Carbono, con el doble propósito de:

- 1º) Correr a la derecha el campo de estabilidad del Fe gamma para poder Austenizar y por lo tanto templar y obtener Martensita.
- 2º) Obtener dureza, algo que depende del %C de la Martensita ya que estos aceros se utilizan generalmente para cuchillería, en donde la estabilidad del filo depende de la dureza del material.

Ambos grupos, son magnéticos lo que los hace fácilmente identificables de los muy populares Aceros Inoxidable Austeníticos (Serie 300).

### 3. ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS

Como ya vimos si a un acero inoxidable se le aumenta el %Cr y se limita el %C la vertical que representa a aleación se situará a la derecha del bucle gamma y el acero será ferrítico a cualquier temperatura, ya que no atraviesa ninguna línea de transformación, y no podrá ser templado, como por ejemplo Tipos 430, 442, y 446.

El %Cr de los Aceros Inoxidables Ferríticos se extiende desde el 10,5% Cr (Tipo 409) hasta el 30% Cr (Tipo 447 y 448). Los aceros con 10-13% Cr y bajo % C, por estar cerca del bucle gamma, a veces debido a la segregación del Cr durante la solidificación, que se concentra en el centro del grano de Ferrita delta, pueden entrar en la zona bifásica de este, y de esta manera tener una estructura duplex de Ferrita con Austenita en borde de grano, la que al templarse produce Martensita, disminuyendo la resistencia a la corrosión, la plasticidad, y la tenacidad.

Por otra parte algo de Martensita en borde de grano puede mejorar la resistencia al crecimiento de grano ferrítico.

Por encima de 30% de Cr se forma una fase Intermetálica compuesta por 46% de Cr y 54% de Fe llamada fase Sigma de composición nominal FeCr, que disminuye la plasticidad de la aleación. Por esta razón se evitan contenidos de Cr superiores a 30%.

Los Aceros Inoxidables Ferríticos tienen ciertas ventajas sobre otros materiales. Tienen un menor contenido de aleación, tienen una resistencia excelente al “pitting” y a la “Crevice Corrosion” inducida por cloruros, han probado ser una solución práctica frente a la Corrosion bajo tensión (SCC) en Cloruros aun en caliente, y tienen un resultado excelente frente a la corrosión por ácidos orgánicos, en la producción de Urea y los de mayor contenido de Cr en medios cáusticos.

Se puede hablar de dos familias de Aceros Inoxidables Ferríticos, los clásicos de los años '50 y '60 que tienen Propiedades Mecánicas bastante disminuidas con respecto a los Austeníticos y la nueva familia de los aceros Inoxidables Ferríticos en donde se hizo hincapié en el mejoramiento de las propiedades mecánicas más que en la resistencia a la corrosión.

Estos Aceros logran su mejor Tenacidad y Ductilidad mediante el control de elementos intersticiales Carbono, Nitrógeno, y quizá oxígeno.

Durante los primeros años de la década del '60 cuando fueron hechas estas observaciones los métodos normales de refinación no podían trasladar a la industria estas observaciones de laboratorio.

### 3.1 ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS. PROPIEDADES y TRATAMIENTO TERMICO

**S**e debe destacar que se puede esbozar un perfil de propiedades de este grupo de aceros inoxidable solo de manera general. Cada acero Inoxidable tiene sus propias características. Los Aceros Inoxidables Ferríticos son aceros aleados solo con Cr y a veces también con Mo. El Cr es un elemento alógeno que retiene la estructura cúbica centrada en el cuerpo del Hierro alfa.

- Estos aceros tienen como mínimo 10,5% de Cr, con este rango de %Cr su resistencia a la corrosión es mínima, a algunos se los suele denominar Inoxidables al agua pues no resisten medios mas agresivos, son en general los mas baratos por tener poco Cr.

- Su ductilidad es menor que la de los aceros inoxidables Austeníticos debido a la inherente menor plasticidad de la estructura cúbica centrada en el cuerpo del Hierro alfa, mas el efecto endurecedor que proporciona la gran cantidad de Cr en solución sólida.

A causa de la baja solubilidad de los intersticiales C y el N en la Ferrita, estos aceros tradicionalmente tenían una limitada utilización debido a su susceptibilidad a la Corrosión Intergranular como así también una alta Temperatura de Transición dúctil-frágil. Hoy en día los procesos de refinación han mejorado, especialmente con la descarburación Argón –oxígeno, lo que permite bajos niveles de impurezas, bajas temperaturas de Transición y mas alta tenacidad. A pesar de esto se los sigue confinando a productos planos y tubulares debido a la comparativamente menor tenacidad de la estructura Ferrítica la que es adicionalmente reducida por el espesor.

Se debe poner especial énfasis en evitar durante la soldadura la contaminación con C y N. Obviamente el Nitrógeno no es apropiado como gas protector y por supuesto deben removerse toda traza de aceite y grasa de las superficies a ser soldadas.

- Su ventaja comparativa con los inoxidables Austeníticos es su inmunidad a la Corrosión bajo Tensión SCC (especialmente en cloruros a alta temperatura). Se los suele usar en tubos de pared delgada de intercambiadores de calor donde SCC sea un problema, por ejemplo en las plantas de procesamiento de petróleo o gas natural. El aumento de la temperatura disminuye el problema de falta de tenacidad y ductilidad.

- Pequeñas cantidades de Níquel, tan bajas como 1,5% son suficientes para inducir SCC, sin embargo la ausencia de Ni reduce la resistencia general a la corrosión y los hace susceptibles en muchos medios. Se comprobó que los Inoxidables Ferríticos son susceptibles en  $H_2S$ ,  $NH_4Cl$ ,  $NH_4NO_3$  y soluciones de  $HgCl_2$ .

- El menos aleado de los Inoxidables Ferríticos, el tipo 409 se utiliza en los convertidores catalíticos de los automóviles y los tipo 405 y 409 se usan para sustituir a los aceros al C de los soportes de tubos de Níquel 600 del sistema de agua a presión de los generadores nucleares de vapor para evitar el Denting (distorsión por acumulación de productos de corrosión entre el tubo y el soporte por Crevice Corrosion). El tipo 430 tiene usos arquitectónicos y como adornos en automóviles donde la corrosión sea moderada.

- Su ductilidad es menor que la de los aceros inoxidables Austeníticos, no endurecen por trabajado mecánico tanto como los Austeníticos, no son templables, son magnéticos, y como todos los Aceros Inoxidables tienen escasa conductividad térmica.

Se los prefiere por su resistencia a la corrosión y su bajo costo, más que por sus propiedades mecánicas.

**Los Aceros Inoxidables Ferriticos tienen tres problemas que pueden acentuarse más o menos según sea la aplicación:**

- a) Excesivo crecimiento de grano
- b) Sensitización
- c) Pérdida de ductilidad por presencia de fase Sigma

a) Por encima de 950°C el proceso de crecimiento de grano se intensifica por la falta de la Recristalización del Cambio Alotrópico de Ferrita a Austenita de estos Aceros. El grano grueso tiene menos ductilidad y menos Tenacidad que el grano fino.

En estos casos la única manera de afinar el grano sería con un Tratamiento de Recristalización con Deformación Plástica Previa solo aplicable a productos semielaborados. En el caso de Soldadura esto no puede realizarse y por ello en materiales donde la soldadura es parte del proceso de fabricación el crecimiento de grano puede ser un problema serio

b) Los Aceros Inoxidables Ferriticos pueden a veces , ya sea por segregación del Cr, o por estar muy cerca del bucle Gamma, no ser totalmente Ferriticos generando en el calentamiento a mas de 900°C algo de Austenita en borde de grano Ferritico. Si luego de esta transformación se los enfría rápidamente la Austenita formada se transformará en Martensita disminuyendo algo la plasticidad pero por sobre todo disminuyendo la resistencia a la corrosión del borde de grano, por ello a estos aceros, para mejorarles su resistencia a la corrosión se los debe enfriar lentamente (al contrario de los Austeniticos) desde una temperatura de de aproximadamente 1000°C. Por otra parte la presencia de Martensita en borde de grano podría mejorar algo la resistencia al crecimiento de grano.

c) A medida que aumentamos la proporción de Cr para mejorar la resistencia a la corrosión, nos acercamos peligrosamente a la transformación de Fe-a  $\sigma$  Fase Sigma ( $\sigma$ ) de estructura cristalina tetragonal que predice el diagrama de equilibrio Fe-Cr. La Fase Sigma ( $\sigma$ ) es un intermetalico duro y frágil que enfragiliza a toda la estructura. La fase Sigma se forma durante el enfriamiento en el rango de 870°C/ 530°C y puede ser redisuelta con calentamientos del orden de 1100°C y su formación evitada por un enfriamiento rápido que retenga la fase de alta temperatura (Fe a).

Hay poca información acerca de la influencia de la Fase Sigma en la resistencia a la corrosión, sin embargo es esperable que una precipitación masiva sea peor que la presencia de colonias aisladas. Ya que la fase sigma es un intermetalico más rico en Cr que la Ferrita su presencia puede afectar la resistencia a la corrosión por una disminución del Cr disuelto en la matriz.

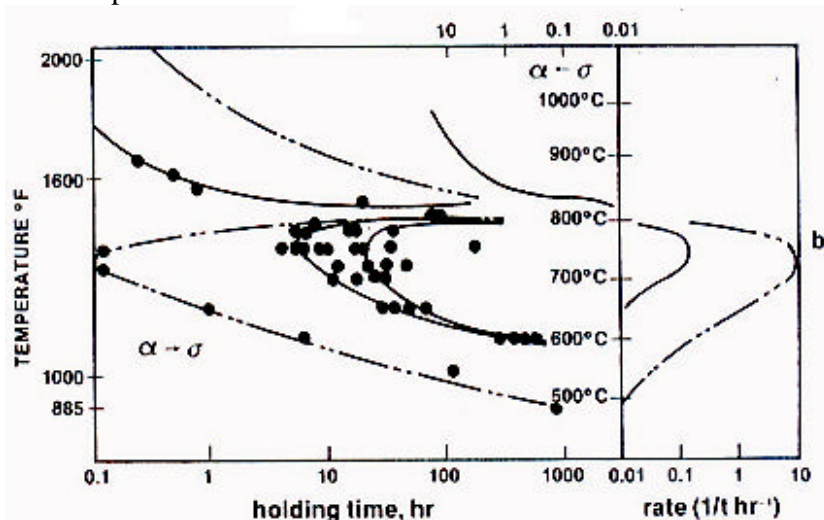


Fig. 3. Transformación Isotérmica de la reacción  $\alpha \rightarrow \sigma$  de una aleación con 46,5% Cr. Líneas llenas corresponde Ferrita recocida. Líneas punteadas a Ferrita deformada en frío.



En aceros Inoxidables Ferríticos con Mo aparece otra fase relacionada a Sigma llamada fase Chi, entre los 550-590°C con una composición nominal  $\text{Fe}_2\text{CrMo}$  aunque hay desviaciones de los valores estequiométricos. La fase Chi precipita más rápidamente que la sigma, siempre acompaña a la fase sigma y reduce los valores de tenacidad a la entalla de Aceros inoxidables Ferríticos.

Realmente la formación de Fase Sigma es lenta y con los enfriamientos encontrados en el procesamiento de los Aceros Inoxidables Ferríticos no llega a ser un problema.

En cambio si es un problema en servicio al mantener estos Aceros altos en Cr o enfriarlos lentamente a la temperatura de 475°C.

### 3.2 FRAGILIZACION A 475°C

**E**n el diagrama de equilibrio Fe-Cr se puede observar que la fase sigma a 475°C se desdobra en una fase rica en Cr (90%Cr) llamada  $\alpha'$  (Alfa prima) y otra rica en Fe (14%Cr).

La dureza y resistencia aumentan con el tiempo de mantenimiento en este rango de temperaturas pero la ductilidad y la tenacidad disminuyen. La máxima velocidad de fragilización tiene lugar a 475°C y por esa razón el fenómeno se le denomina Fragilidad a 475°C (885F Embrittlement).

Aunque como lo expresa la línea punteada a 475°C del diagrama de equilibrio, esta temperatura no está definida, la fragilización a los propósitos prácticos ocurre en el rango de 320-550°C. Si bien el diagrama de equilibrio predice que esta enfragilización podría ocurrir en aceros con menos de 10%Cr, es raro si es que ocurre en aceros con menos de 12 / 15%Cr.

Las partículas de Alfa prima son pequeñas, a lo sumo unos cientos de Å y parecen reducir la ductilidad y la tenacidad por anclaje de dislocaciones. Hay evidencia que  $\alpha'$  puede influenciar en las propiedades mecánicas aun antes de precipitar lo que sugiere un mecanismo de pre-precipitación o envejecimiento por intermedio de Zonas de Guinier-Preston La precipitación de Alfa prima ( $\alpha'$ ) es reversible y puede redisolverse a 815°C.

La presencia de Alfa prima ( $\alpha'$ ) aumenta marcadamente la Temperatura de Transición del ensayo Charpy. Sin embargo aunque el material a temperatura ambiente no posea prácticamente nada de tenacidad, posiblemente tendrá valores razonables a la Temperatura de Servicio que produjo dicha fragilidad. Por lo tanto la fragilidad a 475°C es un problema cuando se requieren valores de tenacidad a temperatura ambiente. Cuando es así un acero Inoxidable Ferrítico con más de 15%Cr no debe ser expuesto a más de 320°C. La cinética de la precipitación de  $\alpha'$  es suficientemente lenta para que no sea un problema durante el procesamiento de estos aceros, pero si en servicio.

### 3.3 EFECTO DEL HIDROGENO

**E**s conocido el hecho que la estructura Austenítica es inmune a la fisuración por hidrogeno debido a la alta plasticidad de la estructura Cúbica centrada en las caras (FCC) del Hierro gamma y los Aceros Inoxidables Austeníticos heredan esta propiedad.

No ocurre lo mismo con los Inoxidables Ferríticos, la presencia de Hidrógeno reduce sustancialmente la ductilidad y cambia el modo de fractura de dúctil a frágil.

La soldadura de los inoxidables Austeníticos se realiza a menudo con gases protectores como Argón con pequeños agregados de Hidrogeno, si esto se hace con los inoxidables Ferríticos se debe hacer un recocido de deshidrogenación inmediatamente después de la soldadura para evitar fisuración. Un recocido a 150°C luego de la soldadura restaura totalmente la ductilidad mostrando que la fragilización es reversible. El mantenimiento durante semanas a temperatura ambiente también permite difundir el

hidrógeno en estado atómico y restaurar la ductilidad pero durante este tiempo podrían producirse fisuras lo que no hace recomendable este tipo de deshidrogenación.

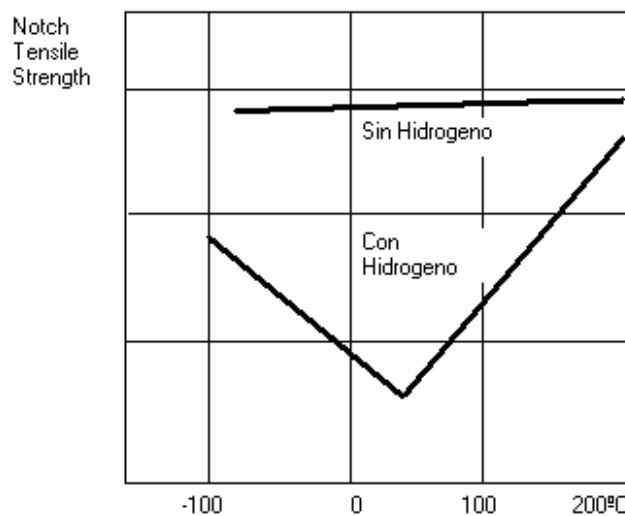
Los Aceros Inoxidables a menudo luego de un procesamiento a alta temperatura deben ser decapados (pickling) para remover el óxido coloreado y a veces hasta de color negro formado a estas altas temperaturas. Este procedimiento de limpieza produce fragilización por el hidrógeno de los ácidos utilizados en la limpieza, y sobre todo si estos ácidos generan o poseen  $\text{SH}_2$  (Ácido sulfhídrico) el que aumenta la actividad del hidrógeno atómico. Otra manera de revertir esta fragilización es mantener al material fragilizado por 10-15 minutos en agua hirviendo.

Por todo lo anterior, si bien la HIC no es un problema particular de los Aceros Inoxidables Ferríticos, los mismos comparten esta patología con todos los aceros Ferríticos. Por ello pasaremos a describir a continuación el mecanismo general, morfología y cualquier otro aspecto relacionado con este tipo de fisuración.

### 3.4 FISURACIÓN INDUCIDA POR HIDRÓGENO. (HIC).

**E**ste tipo de fisuración tiene lugar si se presentan simultáneamente las siguientes condiciones:

- Una Concentración de Hidrógeno Crítica
- Tensiones de Tracción Elevadas
- Una Microestructura Susceptible
- Una Temperatura entre  $-100^\circ\text{C}$  y  $+200^\circ\text{C}$



**Fig. 4** La resistencia de un acero entallado conteniendo hidrógeno pasa por un mínimo cerca de Temperatura ambiente.

### 3.4.1 FORMACION

**E**l hidrógeno atómico debe considerarse un verdadero veneno de los Aceros Ferríticos (Los Inoxidables Austeníticos, serie 300, no sufren HIC). Puede difundir a través de la Estructura Cristalina del Acero debido a su pequeño diámetro atómico recombinándose a hidrógeno molecular en espacios vacíos tales como exfoliaciones o inclusiones, formando excepcionalmente ampollas de hasta un (1) metro de diámetro en chapas relativamente finas (19mm). Puede quedar algo de hidrógeno en forma atómica anclando dislocaciones y reduciendo la ductilidad. Peor aun puede producir fisuras en zonas de alta dureza tales como metal de soldadura, ZAC y puntos duros. A este proceso se le denomina Fisuración Inducida por Hidrógeno (HIC).

Esta recombinación acumula moléculas de hidrógeno en forma gaseosa desarrollando presiones suficientemente altas para romper enlaces atómicos y generar fisuras si la microestructura no es plástica. Las presiones generadas se calculan teóricamente (en forma aproximada) y llegan a valores de  $10^5$  (cien mil) Atm. En el caso del Nitrógeno estos mismos cálculos dan valores de 4 Atm. De lo anterior surge la peligrosidad del Hidrógeno frente al Nitrógeno o cualquier otro gas. Cantidades tan pequeñas como 0,0001 % en peso pueden producir fisuras en el acero.

### 3.4.2 ACEROS RESISTENTES A LA PENETRACIÓN DE HIDRÓGENO

**D**entro de los materiales mas usados en la industria petroquímica se encuentran los aceros Serie 500, también Martensíticos, resistentes a la penetración de Hidrógeno, están aleados al CrMo y si bien no debe considerárselos Inoxidables por tener menos de 10% de cromo, por tener ciertas propiedades debidas a la película de cromo y cierta inoxidabilidad parcial vamos a citarlos. Los ejemplos clásicos son los aceros 501 y 502 (5Cr-0,5Mo), 503 (7Cr-0,5Mo) y 504 (9Cr-1Mo)

#### Propiedades:

La influencia del Precalentamiento acerca de su habilidad para evitar la formación de estructuras duras se puede observar claramente en el caso de estos aceros, por ejemplo el acero SA-335 Gr. P5 con 5% de Cr y 0,5% de Mo. Si este acero es soldado sin precalentamiento (PC) presenta una ZAC totalmente Martensítica con durezas de aproximadamente HB 450.

Si en cambio la soldadura se realiza con precalentamiento de 300°C la cantidad de Martensita en la ZAC es solo del 50% y la dureza es algo superior a 300HB.

Como la dureza requerida en este acero cuando se usa en la industria Petroquímica (ASME B 31.3) Parag. 331.1.7 y tabla 331.1.1 debe ser como máximo 241HB para evitar SCC en la ZAC y/o metal de soldadura se hace imprescindible realizar un Tratamiento Térmico Post Soldadura para revenir ese 50% de Martensita remanente luego del PC y así disminuir la dureza a valores inferiores a 241HB.

Cuando se sueldan aceros al CrMo si el PC no se hace correctamente (temperatura insuficiente) y no disminuye la dureza lo previsto, luego el Tratamiento Térmico Post Soldadura (TTPS) especificado (pensado para un PC correcto) podría no ser suficiente en tiempo o temperatura de permanencia teniéndose que repetir el TTPS a cargo del responsable del PC con los conflictos correspondientes.

En general estos aceros deben trabajar a altas temperaturas y por lo tanto tienen propiedades refractarias. Deben resistir la Corrosión a Altas Temperaturas, el Creep, La Fatiga Térmica y por último deben tener Resistencia a la Penetración de Hidrógeno, propiedad que logran gracias a la película de óxido de Cromo impermeable a este tipo de contaminante.

Por otra parte como el Carburo de Cr es menos fácil de disociar que el  $\text{CrFe}_3$  no se descompone en C y Cr. Pues el C podría asociarse con el Hidrógeno para formar Metano y de esta manera se produciría

poros y descarbonización del acero (Hydrogen Attack). La presencia de Molibdeno (Mo) además de mejorar la resistencia al Creep es para evitar la fragilidad de Revenido (una forma de fragilidad que tiene lugar cuando un acero templado es calentado o cruza lentamente el rango de temperaturas de 500 / 550°C), Tratamiento Térmico utilizado como TTPS de estos aceros para disminuir la dureza de la ZAC y metal de aporte.

### 3.4.3 MORFOLOGIA:

**L**as fisuras por HIC son en general transgranulares y se inician luego de finalizada la soldadura con retardos de hasta dos semanas, por esa razón a este tipo de fisuración también se lo llama fisuración retardada por hidrógeno.

#### **Nota Importante:**

“Estas fisuras pueden no ser detectadas fácilmente, pueden estar en la ZAC, ser del tipo "Under Bead " y pueden en el caso de ser "Toe Crack" no llegar a la superficie. Esto significa que pueden no ser detectables por ensayos de tintas penetrantes o partículas magnéticas.

Dependiendo de su orientación pueden no ser visibles por radiografía y pueden escapar a la detección por US aunque esta es quizá la mejor técnica para detectar fisuras de este tipo.

Si estas fisuras no se detectan es altamente probable que fallen en servicio, de ahí la necesidad de prevenir evitando su formación”

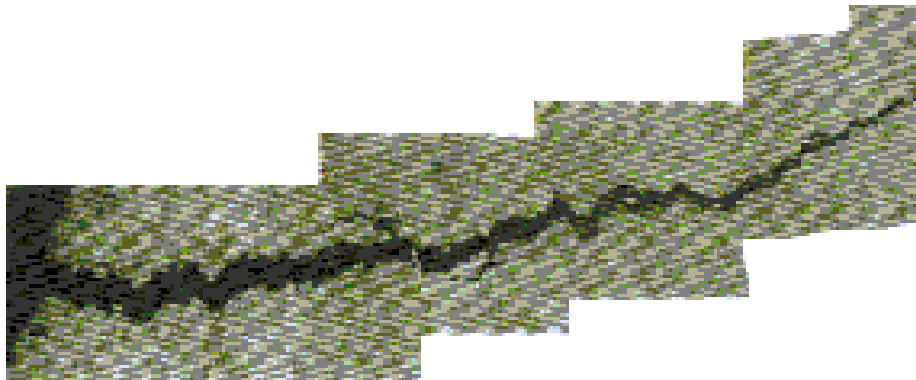


Fig.5. Falla en un acero inoxidable Tipo 301 deformado plásticamente en frío debida a HIC

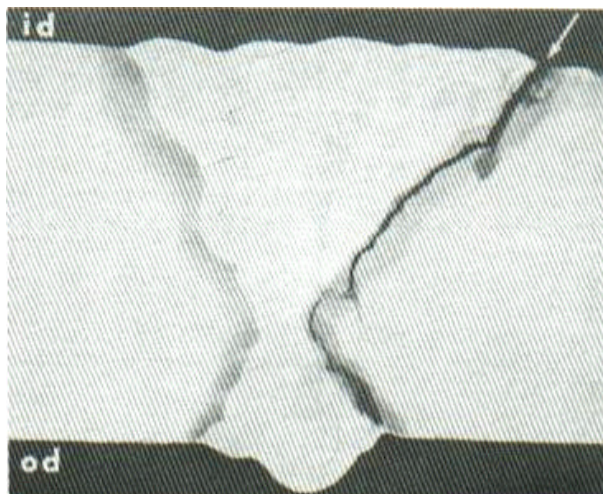
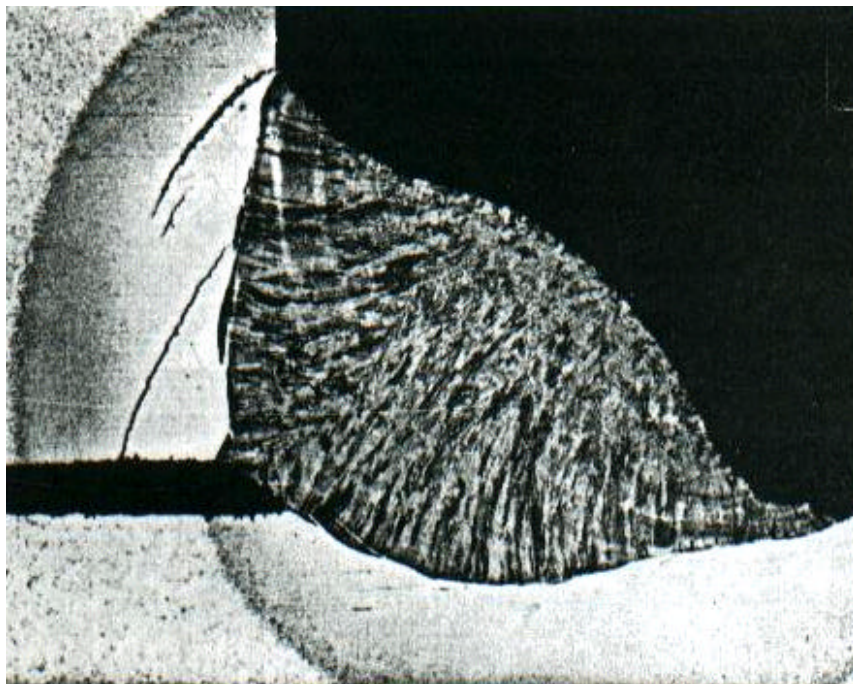


Fig.6. Falla por HIC (Under-Bead Cracking) en la ZAC con estructura Martensítica de un acero al Carbono de un tanque de almacenamiento de Ácido Fluorhídrico (HF)



**Fig.7. HIC en la ZAC en un acero al C-Mn**

#### **3.4.4 RANGO DE OCURRENCIA DE HIC:**

La fisuración por hidrógeno ocurre solo con microestructuras susceptibles. En aceros al C o al CMn una razonable indicación de la presencia de tales estructuras es cuando la dureza supera los 350HV (331HB) (35RC) que corresponde a la presencia de Martensita y a veces de Bainita. (Welding Institute, Abington Hall, Abington, Cambridge.U.K.)

Durante el enfriamiento del acero desde el estado Austenítico, el rango de temperaturas de formación de dichas estructuras se extiende desde los 550°C hasta los 200°C, dependiendo de su composición química. Se encontró que existe una correlación entre la susceptibilidad a la fisuración y la velocidad de enfriamiento a 300°C. Por esta razón temperaturas de precalentamiento de 300°C tienen un efecto muy marcado en la velocidad de enfriamiento, y por lo tanto en la tendencia a la fisuración.

Por su parte La Asociación Americana de Ingenieros de Corrosión NACE, para el caso de Fisuración Inducida por ácido sulfídrico H<sub>2</sub>S, un tipo de HIC muy común en la industria del gas y el petróleo recomienda en la norma MR 0175 "Sulfide Stress Cracking Resistant Metallic Materials in Oilfield Equipment" que la dureza no supere los 22 HRC o sea unos 238 HB.

Este problema se encuentra en pozos de petróleo o gas profundos contaminados con H<sub>2</sub>S y durante el procesamiento de dichos productos

Se encontró que aceros tratados térmicamente con 560 MPa (55Kg/mm<sup>2</sup>) de límite de fluencia, se fisuran en muy poco tiempo. Esto puede solucionarse incrementando la Temperatura de Servicio hasta valores de por lo menos 150°C o incrementando el PH del producto por encima de 6.

**La HIC o Fisuración Retardada por Hidrógeno se produce luego de finalizada la soldadura y a temperatura ambiente. Como ya dijimos ocurre entre -100°C y +200°C.**

.- No ocurre a menos de -100°C por que la difusión es insuficiente para que los átomos de Hidrógeno difundan dentro del material y se recombinen a Hidrógeno molecular y produzcan HIC.

.- No ocurre a más de 200°C por que a temperaturas superiores a 200°C todo el hidrogeno se encuentra en estado atómico sin posibilidades de formar moléculas  $H_2$  y la difusión es suficientemente elevada para una masiva migración de átomos a través de la superficie hacia la atmósfera.

.- **En el caso que se desee Deshidrogenar un material que se sospecha pueda tener hidrógeno atómico antes de su reparación por Soldadura se utilizan temperaturas del orden de 200°C / 250°C y no mayores. (Ver Temperaturas de Deshidrogenado)**

### 3.4.5 DESHIDROGENADO

**E**l único calentamiento que se realiza antes de la Soldadura es el llamado Deshidrogenado (baking, ó Bake - out en Ingles). Tiene como objetivo remover del material a ser soldado el hidrógeno que pudiese haber quedado debido al efecto contaminante, en servicio, de sustancias que generan hidrógeno atómico ya que los equipos que han estado en presencia de Hidrógeno atómico son susceptibles de fisurarse durante su reparación por Soldadura. La causa es la presencia de Hidrogeno atómico en el material base, y es imperativo eliminarlo antes de soldar.

Este gas, en forma atómica, penetra en el acero causando Fisuración, porosidad, empolladuras y pérdida de ductilidad. Con el paso del tiempo, el Hidrógeno atómico difunde en el retículo cristalino del acero recombinándose a hidrogeno molecular en espacios vacíos tales como exfoliaciones o inclusiones, formando ampollas de hasta un (1) metro de diámetro en chapas relativamente finas (19mm). Puede quedar algo de hidrogeno en forma atómica anclando dislocaciones y reduciendo la ductilidad. Peor aun puede producir fisuras en zonas de alta dureza tales como metal de soldadura, ZAC y puntos duros. A este proceso se le denomina Fisuración Inducida por Hidrógeno (HIC).

- La fragilizacion por Hidrogeno de aceros Ferriticos ocurre solo a bajas Temperaturas, cercanas a la temperatura ambiente. Es posible evitar la Fisuración en microestructuras duras manteniéndolas un tiempo a suficientemente alta Temperatura, ya sea para permitir al hidrogeno difundir fuera del material y/o para que la micro estructura se ablande por revenido. Este principio se emplea en soldaduras multipasadas y en TTPS.

- Otro problema que puede producir el Hidrogeno es a alta temperatura, se denomina Ataque por hidrogeno (Hydrogen Attack) y ocurre cuando el hidrogeno atómico reacciona con el carbono de los carburos produciendo burbujas de metano. Las consecuencias son, pérdida de resistencia mecánica por descarburación del acero y la generación de sopladuras o poros con Metano. Este problema puede ocurrir en Servicio a altas temperaturas de equipos de procesamiento de petróleo o cuando se deshidrogena a Temperaturas demasiado elevadas (>250°C).



Fuentes usuales de Hidrógeno atómico son:

- Reacciones de diversos procesos químicos
- Adición de Hidrógeno con propósitos varios
- Presencia de Hidrógeno atómico en el producto.
- Aplicación de recubrimientos Electrolíticos
- Procesos de Limpieza Química de óxidos. (Pickling)
- Protección Catódica
- Eventual descomposición de la Humedad.

Un caso particular es la presencia de ácido sulfídrico ( $H_2S$ ), que acelera la entrada de Hidrógeno y aumenta la actividad de Hidrogeno atómico. El resultado es a veces mal llamado Corrosión Bajo Tensión por ácido sulfídrico porque en realidad es una forma de HIC.

“La Asociación de Ingenieros de Corrosión (NACE), norma MR -01-75, "Sulfide Stress Cracking Resistant Metallic Materials for oil field equipment", establece que para evitar este tipo de HIC la dureza tanto del Material Base como el material de Aporte y ZAC no debe superar los RC 22.”

#### **3.4.6 TEMPERATURAS DE DESHIDROGENADO:**

**L**as temperaturas corrientes de Deshidrogenado no están tan acotadas como las de T.T.P.S. y suelen variar entre 150°C y 450°C aunque como veremos mas adelante las temperaturas mas apropiadas rondan los 200°C – 250°C. Un incremento en la Temperatura por encima de la Temperatura ambiente incrementa la velocidad de difusión del hidrógeno y de esa manera se acelera su remoción de la soldadura. Este efecto es particularmente marcado en el rango de 20°C – 150°C. Por encima de los 150°C la velocidad de difusión sigue aumentando pero a un ritmo menor. Para elegir la Temperatura de Deshidrogenado hay que tener en cuenta los siguientes factores:

- 1) Debe ser superior a 200°C ya que por encima de esa temperatura todo el Hidrógeno es atómico, condición necesaria para su difusión
- 2) El aumento de la velocidad de difusión por encima de los 150°C no es tan importante como por debajo de 150°C
- 3) Si bien existe la tentación de realizar deshidrogenados a temperaturas superiores (450°C a 650°C) para maximizar la velocidad de difusión debe tenerse en cuenta que a temperaturas superiores a 200°C /250°C el hidrogeno atómico puede reaccionar con los carburos (especialmente con carburos simples de hierro y menos probablemente con carburos de cromo) con el doble perjuicio de decarburar el acero disminuyendo su resistencia mecánica y de formar burbujas de metano ( $CH_4$ ). Este tipo de falla se lo denomina Ataque por Hidrogeno (Hydrogen Attack) y suele ocurrir en servicio a alta temperatura de equipos de Refinerías de Petróleo.
- 4) La solubilidad del Hidrogeno en el hierro aumenta con la temperatura y por lo tanto a altas temperaturas el hierro disuelve en equilibrio mas Hidrogeno que a bajas temperaturas de esa manera quedaría mas hidrogeno en la red de hierro que realizando el deshidrogenado a mas bajas temperaturas, además a altas temperaturas la fuerza impulsora (debida a la sobresaturación) para expulsar al hidrogeno es menor.

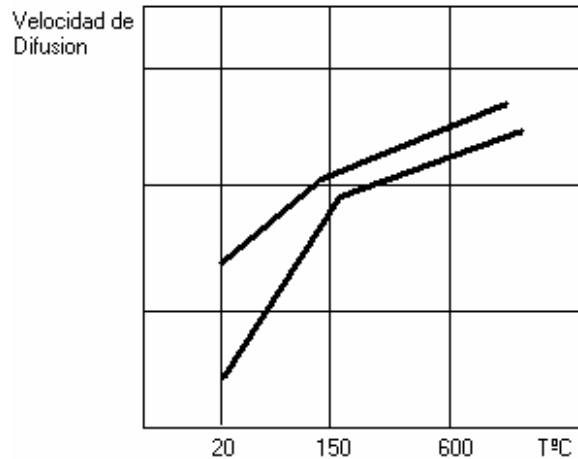


Fig.8 La Velocidad de difusión del Hidrógeno en un acero Ferrítico disminuye por encima de los 150°C

### 3.5 DEFORMABILIDAD

**L**os Aceros Inoxidables Ferríticos tienen un endurecimiento por Trabajo Mecánico menor que los Austeníticos, por ello son más fáciles de embutir que los Austeníticos pero no son tan dúctiles como ellos.

La reducción durante el laminado en frío, más que la composición química, parece ser la variable significativa en el control de la deformabilidad de los Aceros Inoxidables Ferríticos. Una gran reducción final parece ser la solución y reducciones del orden de 85% antes del recocido final de recristalización son las normalmente elegidas.



#### 4. ACEROS INOXIDABLES MARTENSITICOS

**Y**a vimos que los aceros Inoxidables Martensiticos son aquellas aleaciones Fe-Cr que atraviesan el campo gamma del Diagrama de equilibrio Fe-Cr y por lo tanto pueden Austenizarse y Templarse Martensiticamente. Pueden estar aleados con pequeñas cantidades de otros elementos pero usualmente no con mas de 2-3%. Son Ferriticos en estado de Recocido pero son Martensiticos con un enfriamiento mas rápido ya sea en aire o en un medio líquido desde una temperatura superior a la crítica.

Aceros de este grupo en general no contienen más de 14% de Cr – excepto los tipos 440 A, B, y C que contienen 16-18%Cr y una cantidad de Carbono suficiente para producir el endurecimiento. Estos tres aceros son solo resistentes a la corrosión en estado de temple pues al tener mucho Carbono si este se encontrase formando carburos (de Cromo) disminuiría la cantidad de Cr disuelta en el Hierro hasta valores inferiores al 10%, límite inferior del %Cr para que un acero sea Inoxidable.

Estos aceros pueden ser templados y revenidos de la misma manera que los aceros aleados. Tienen una excelente resistencia mecánica y son magnéticos. En la tabla 1 se observan las propiedades mínimas de estos aceros.

Propiedades Mecánicas Mínimas de los Aceros Inoxidables Martensiticos						
UNS number	Designación común	Resistencia a la Tracción MPa	Resistencia a la Fluencia MPa	Alargamiento o a la Rotura %	Reducción en área %	Dureza
S40300	403	485	205	25(b)		HRB 88 max
S41000	410	450	205	22(b)		HRB 95 max
S41008	410S	415	205	22		HRB 95 max
S41040	410Cb	485	275	12	35	
S41400	414	795	620	15	45	
S41800	418(c)	1450 (d)	1210(d)	18(d)	52(d)	
S42000	420(e)	1720	1480(d)	8(d)	25(d)	HRC 52(d)
S42200	422(f)	965	760	13	30	
S43100	431(c)	1370(d)	1030(d)	16(d)	55(d)	
S44002	440A	725(d)	415(d)	20(d)		HRB 95(d)
S44003	440B	740(d)	425(d)	18(d)		HRB 96(d)
S44004	440C	760(d)	450(d)	14(d)		HRB 97(d)
S50100	501	485(d)	205(d)	28(d)	65(d)	
S50200	502	485(d)	205(d)	30(d)	70(d)	
	414L	795(d)	550(d)	20(d)	60(d)	
	416 plusX	515	275	30	60	

c) Revenido a 260°C d) Valores Típicos. E) Revenido a 205°C. f) Doble revenido

Los aceros Inoxidables Martensiticos se templean cuando son enfriados directamente al aire luego del proceso de laminación en caliente, por lo tanto deben ser recocidos entre 650°C y 760°C por alrededor de 4 horas luego de la laminación. Este recocido del proceso difiere del recocido total, que se realiza a 815-870°C con un enfriamiento dentro del horno a velocidades de 40 a 55°C / hora hasta los 540°C y luego enfriados en aire hasta temperatura ambiente.

Ocasionalmente, los Aceros Martensiticos son comercializados en la condición de revenido, o sea enfriándolos directamente desde la temperatura de laminado al aire, con el objeto de Templar al Acero y luego reviniéndolos a 540-650°C o también recalentándolos hasta 1010-1065°C, enfriándolo al aire para templearlos y luego reviniéndolos a 540-650°C.

- 1) En el Tratamiento Térmico de Aceros inoxidables Martensíticos, temperaturas de hasta 480°C se consideran temperaturas de Distensionado o relevamiento de las tensiones Residuales, debido al poco cambio en la Resistencia a la Tracción y la Dureza de aceros Templados y calentados a estas relativamente bajas temperaturas.
- 2) Temperaturas del orden de 540-650°C se las denomina Temperaturas de revenido
- 3) Temperaturas entre 650-760°C se denominan Temperaturas de recocido aunque estas temperaturas estén por debajo de Ac1.

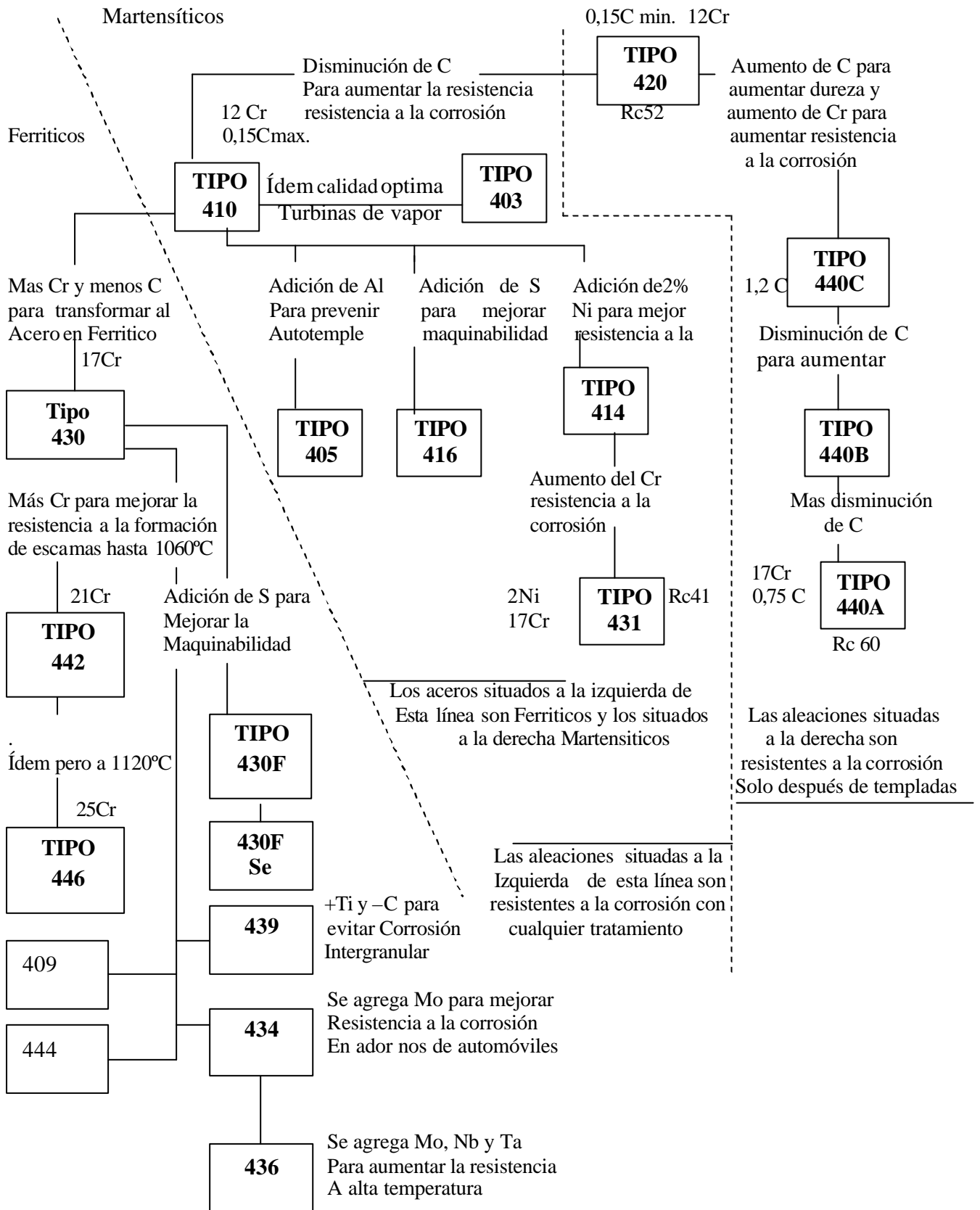
#### **4.1 SOLDABILIDAD**

La alta templabilidad de estas aleaciones hace que se produzca Martensita tanto en el cordón de soldadura como en la Zona Afectada por el Calor (ZAC) adyacente. La estructura Martensítica, cuya dureza aumenta con el contenido de carbono tiene una tendencia a la fisuración muy importante durante la soldadura. Esto puede ser revertido parcialmente con el Precalentamiento de la soldadura. Es práctica común precalentar como mínimo a 200°C pero si la pieza tuviese espesores gruesos o gruesos y finos se sugiere temperaturas mas altas (300-350°C). Debido a que algo de Martensita siempre se produce a pesar del precalentamiento, se suele realizar un Tratamiento térmico post Soldadura de revenido a temperaturas del orden de 600-750°C.

Si no se realiza el revenido post soldadura puede realizarse un Recocido a 850-900°C durante dos horas y luego enfriar a una velocidad no mayor de 50 °C por hora hasta los 600°C. Por debajo de 600°C se permiten enfriamientos mas rápidos, donde solo se debe limitar la velocidad de enfriamiento por las tensiones térmicas que pudiesen generar (aproximadamente 200°C por hora por pulgada de espesor).

En general se utiliza como material de aporte los tipos 410 o 420 pero con el contenido de carbono en el centro o en el mínimo del rango especificado para evitar excesivo endurecimiento de la soldadura. Para aquellas soldaduras que no lleven Tratamiento Térmico Post Soldadura se especifica usualmente como material de aporte los tipos Austeníticos 308 o 309. En estos casos la zona afectada por el calor ZAC será resistente, dura, y algo más frágil mientras que el cordón de soldadura será dúctil y capaz de absorber las deformaciones por fluencia.

## 4.2 Desarrollo de los Aceros Inoxidables Ferríticos y Martensíticos



## 5. ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS

**L**a adición como mínimo de 8% de níquel a un acero con 18% de cromo lo transforma en austenítico manteniendo sus características de inoxidable. Esta y otras modificaciones, constituyen la serie 300 de la familia de Aceros inoxidable Austeníticos o también llamados al cromo-níquel.

La Figura 13, una serie de diagramas de equilibrio Fe-C con 18% Cr y contenidos crecientes de níquel muestran la influencia del níquel para expandir el campo  $\gamma$  (Austenita) y disminuir hasta casi un 100% el campo  $\alpha$ . Se puede observar del diagrama que a temperatura ambiente solo se encuentra Austenita y carburos, de hierro y de cromo, dependiendo de la cantidad de carbono de la aleación.

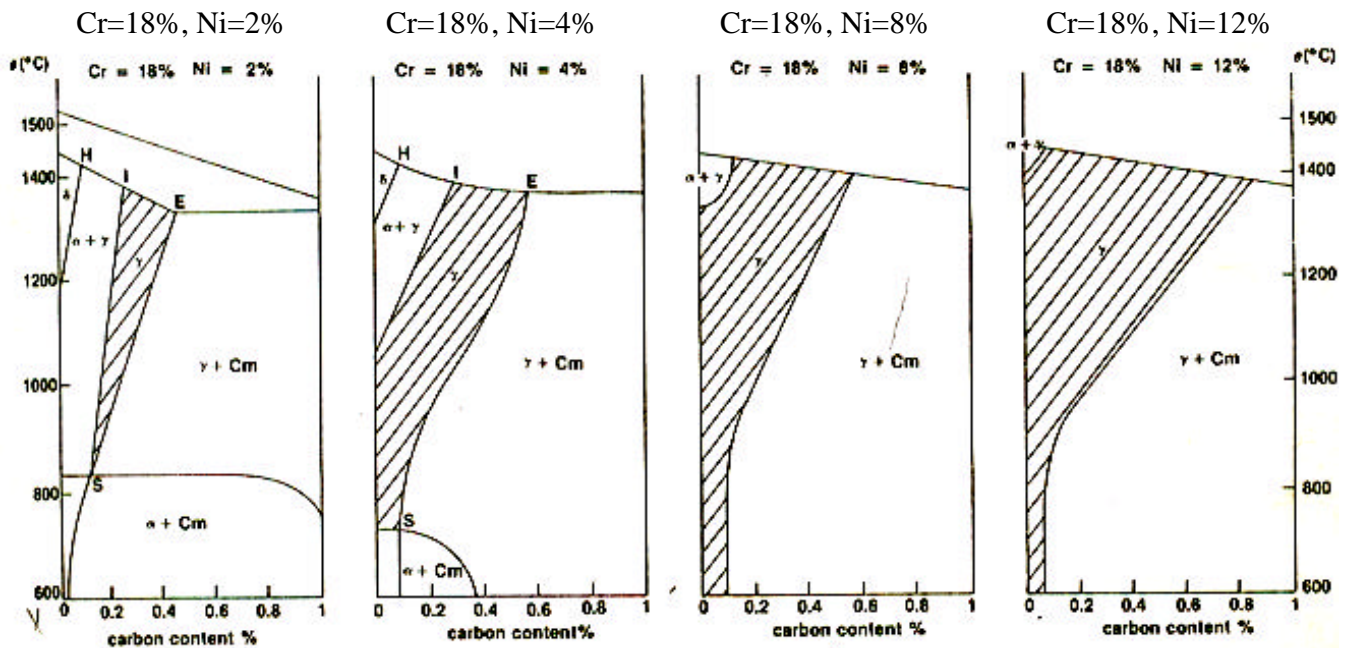


Fig.9 Influencia del Níquel en la fase gamma de un acero con 18% Cr

La inherente plasticidad de la estructura cúbica centrada en las caras (FCC) de la Austenita transmite su tenacidad, reducción en área y excelente resistencia al impacto aun a temperaturas criogénicas a estos aceros.

Para aplicaciones con corrosión es necesario el control del contenido de carbono por debajo de 0,08% (304 y 316). Cuando estos aceros se sueldan se deben tomar precauciones adicionales y frecuentemente se especifican valores de carbono inferiores a 0,03% (304L y 316L), "L" es la abreviatura de Low Carbon en ingles.

A veces se le adiciona elementos de aleación estabilizantes del carbono, como el Titanio (321) o Niobio (347) como medio de impedir la formación de carburos de cromo durante el servicio o el procesamiento a altas temperaturas. El carbono se combinará preferiblemente con el Ti (como mínimo 4 veces el contenido de Carbono) o con el Nb, también llamado columbio en EEUU (como mínimo 10 veces el contenido de carbono) permitiendo al Cr seguir en solución sólida en el hierro para impartir resistencia a la corrosión.

Los aceros tipo 321 y 347 son denominados aceros Inoxidable Estabilizados. Las razones para la limitación del carbono se verán en las próximas páginas.

El contenido de carbono a veces se eleva para incrementar la resistencia a alta temperatura (0,25%C en el tipo 310, y 0,2 a 0,6% C en el HK una aleación fundida para altas temperaturas) y donde la resistencia a la corrosión es de importancia secundaria.

Los aceros inoxidable Austeníticos no pueden ser templados para obtener Martensita, ya que el Níquel estabiliza a la Austenita a temperatura ambiente y aun por debajo de ella.

A pesar de la ductilidad inherente de estos aceros es necesario controlar algunos factores para obtener resultados óptimos, sobre todo si estamos hablando de Soldadura u otros procesos que utilicen altas temperaturas.

Como familia, la serie 300 de aceros Inoxidables puede identificarse por que no son magnéticos.

Los Aceros Inoxidables Austeníticos son lejos los mas usados por su ductilidad lo que los hace ideales para ser soldados, un proceso muy utilizado en la construcción de recipientes y cañerías de la industria Química y Petroquímica en donde la Corrosion es una condición de servicio determinante.

**La Fisuración Inducida por Hidrógeno (HIC) no es un problema estos aceros debido a su baja resistencia mecánica (baja dureza), solo cuando están deformados plásticamente en frío puede presentarse HIC.**

Podría tenerse en cuenta para el caso de aceros disímiles cuando haya aceros Ferríticos en la junta soldada.

En general no se obtienen beneficios con el precalentamiento (PC) de la soldadura de estos aceros sino más bien un deterioro de la resistencia a la Corrosión Intergranular como consecuencia de la precipitación de carburos de Cromo en borde de grano.

Además el PC aumenta el riesgo de fisuración en caliente y a la distorsión por su mayor coeficiente de dilatación con respecto a un acero Ferrítico.

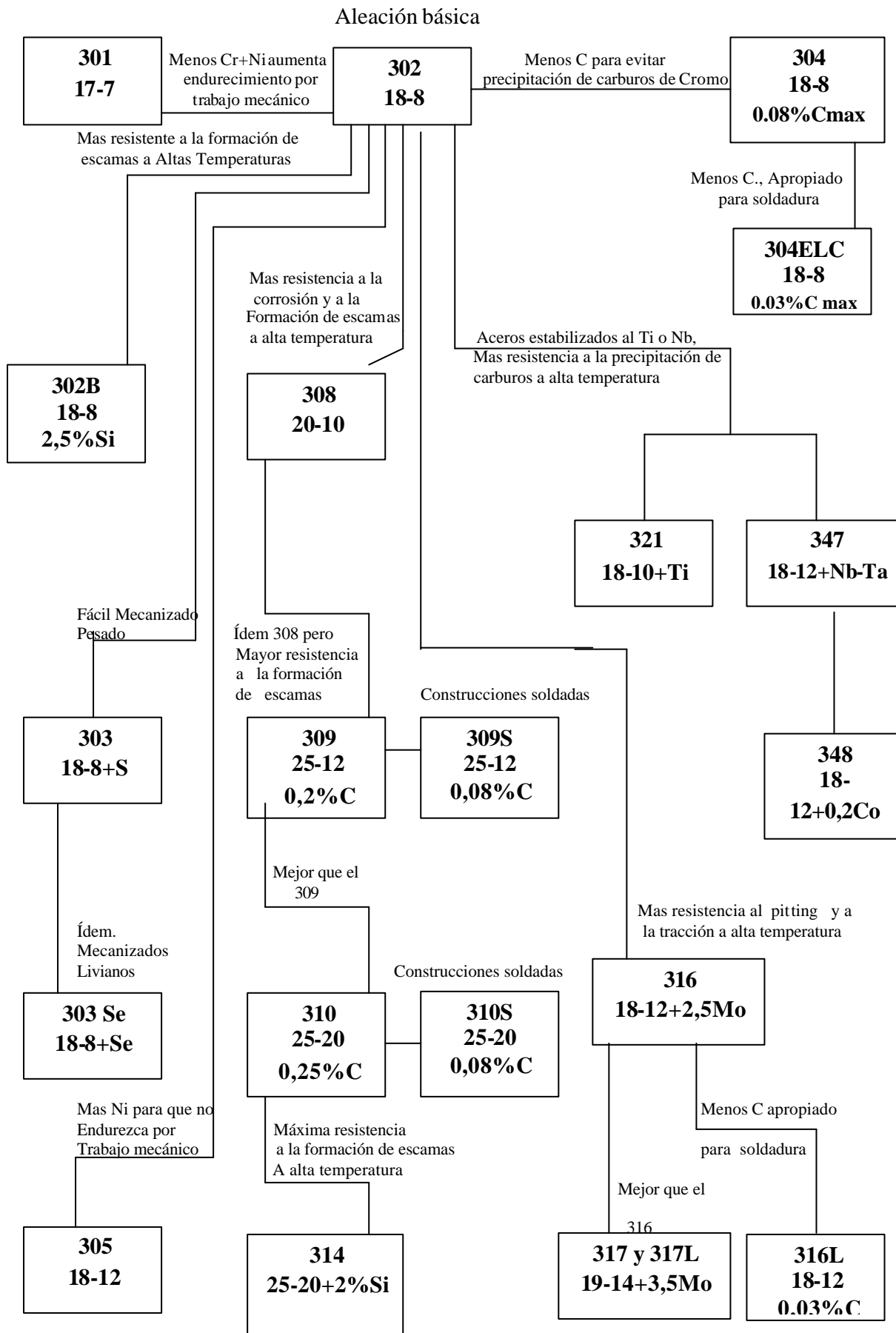
En la Soldadura de los Aceros Inoxidables Austeníticos es practica generalizada mantener la temperatura del material base (y la ZAC) lo mas baja posible, esto se logra usando bajas intensidades de corriente (compatibles con una adecuada penetración y fusión), arco corto, secuencia de paso peregrino, cordones cortos, o simplemente esperando que la pieza se enfríe entre cordón y cordón. Es una práctica corriente limitar la temperatura a valores donde el material pueda tocarse con la mano (70°C).

Como excepción y rara vez puede ser requerido un calentamiento a 500°C con el objeto de producir precipitación de carburos (de Nb) en aceros inoxidables AISI 347 estabilizados al Nb (Niobio) (en EEUU Columbio) o en aleaciones de Ni (Níquel) de una manera controlada para evitar la precipitación en servicio produciendo fragilidad.

Este último Tratamiento se realiza si fuese necesario mediante un Tratamiento Térmico Post Soldadura.

Ciertos aceros Inoxidables Austeníticos llamados “Metaestables” tienen la propiedad de desarrollar mayor dureza y resistencia que los llamados “Estables” cuando son deformados por trabajado mecánico en frío ya que la deformación plástica es el disparador de la transformación de Austenita en Martensita

## 5.1 DESARROLLO DE LOS INOXIDABLES AUSTENITICOS



## DESARROLLO DE LOS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS

Tipo		Descripción
302		Aleación básica con 18% de Cr y 8% de Ni
302B		Se agrega Silicio para mejorar la resistencia a la formación de escamas a alta temperatura
303		Agregado de S (0,15 min.) al grado 302 para mejorar maquinabilidad
304		Menos %C(0,08%) que el 302 para mejorar resistencia a corrosión intergranular
304L		Menos de 0,03% C (para reducir riesgos de corrosión intergranular
304N		Agregado de N para aumentar la resistencia mecánica.
304LN		Agregado de N al 304L para aumentar la resistencia mecánica.
308		Agregado de Cr y Ni (20-10) para mejorar resistencia a la corrosión y a la formación de escamas. Se usa como aporte en soldadura.
309/309S		Mas Cr y Ni para aumentar resistencia a la formación de escamas a alta temperatura
310/310S		Mas Cr y Ni para aumentar aun mas la resistencia a la formación de escamas a alta temperatura
316		Agregado de 2-3%Mo mejora resistencia al Pitting y a la tracción a alta temperatura
316N		Agregado de 0,15% N para aumentar resistencia mecánica
316F		Agregado de S y P para mejorar Maquinabilidad
316L		Disminución del %C para mejor resistencia a Corrosion Intergranular en soldadura
316LN		Agregado de 0,15%N para aumentar resistencia mecánica
317		Mas Cr y Ni (19-14+3,5%Mo) mejora resistencia a la corrosión
317L		Menos C para mejorar resistencia a la Corrosión intergranular especialmente en soldadura
347		Acero Estabilizado con Nb y Ta para formar carburos de Nb y Ta en vez de Cr
348		Acero Estabilizado con Ta y Co limitados para aplicación nuclear.
321		Acero Estabilizado con Ti para formar carburos de Ti en vez de carburos de Cr
303		Agregado de S (0,15 min.) al grado 302 para mejorar maquinabilidad
202		Se reemplaza parcialmente el Níquel por N y Mn. 8% Mn y 0,25N
205		Se reemplaza parcialmente el Níquel por N y Mn 15% de Mn y 0,35N
201		Se reemplaza parcialmente el Níquel por N y Mn. 6% Mn y 0,25N
314		Se incrementa el Si para aumentar la resistencia a la formación de escamas a alta temperatura
303		Se agrega S para aumentar maquinabilidad
303Se		Se agrega Se para aumentar maquinabilidad y mejorar terminación superficial
330		Más Ni (18-35) para aumentar resistencia al shock térmico y carburización.

Estos aceros tienen también tres problemas asociados a las altas temperaturas ya sea de servicio o durante la fabricación (soldadura).

Ellos son:

- 5.2 SENSITIZACION
- 5.3 FISURACION EN CALIENTE
- 5.4 FORMACION DE FASE SIGMA

## 5.2 SENSITIZACION. CORROSION INTERGRANULAR ( CIG)

En el rango de 420- 850°C el cromo y el carbono disueltos en el hierro ? de estos aceros se combina y precipita en el borde de grano como carburo de cromo. La disminución de Cr de la solución sólida en las adyacencias del borde de grano deja poco Cr para formar la película protectora de oxido de cromo. Esta situación deja al acero inoxidable vulnerable a ciertos medios y se la denomina Sensitización. La corrosión resultante es intergranular como consecuencia de la precipitación de los carburos de Cr, y en este orden cronológico.

La soldadura de estos aceros produce áreas adyacentes al cordón que alcanzan las temperaturas antedichas, debido a ello estos aceros se sensitizan en dos bandas paralelas al cordón de soldadura levemente alejadas de este.

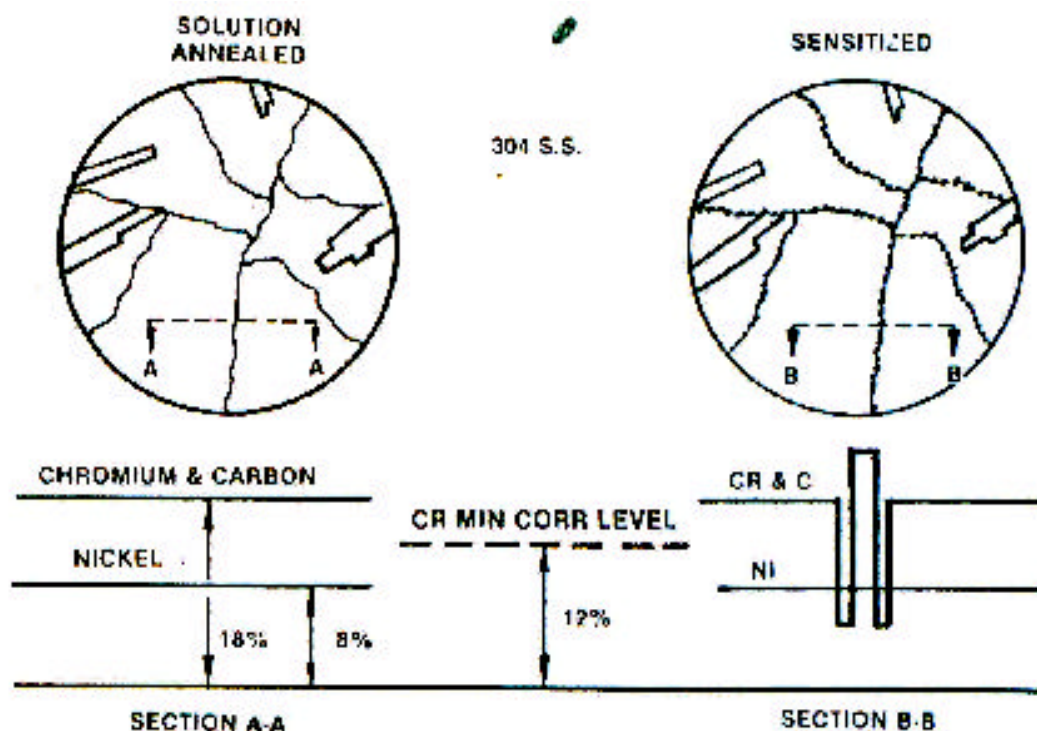


Fig 10. Diferencia en la distribución de Cr de una Microestructura sensitizada y no sensitizada



Ya que el carbono es el ingrediente esencial en la formación de carburo de cromo y la posterior Sensitización, un remedio es la disminución del carbono disponible para la formación de carburo de cromo.

Esto se puede hacer de varias formas:

1) Una manera sería la disminución del contenido de carbono, la Fig 6 muestra como la relación Tiempo-temperatura causa Sensitización para varios contenidos de carbono de acuerdo al Strauss test. Para práctica normales de soldadura un máximo de 0,03% C (grado L) es considerado suficientemente bajo para prevenir Sensitización.

Para electrodos revestidos se permite un máximo de 0,04% C. Nótese que (Fig 6) si el contenido de carbono es 0,02 o menor, la precipitación de carburos no ocurrirá excepto después de 10 horas. Si la técnica de soldadura utilizada asegura un enfriamiento rápido, no habrá tiempo suficiente para la formación de carburos y la Sensitización del acero no ocurrirá.

Desafortunadamente las soldaduras sensitizadas lucen, una vez finalizado el proceso de soldadura, exactamente igual que las no sensitizadas por lo tanto soldadores que no estén familiarizados con las particularidades de estos aceros podrían generar soldaduras defectuosas en casos particularmente sofisticados. Los grados L y EL (Low y Extra Low Carbon) de bajo carbono minimizan este riesgo.

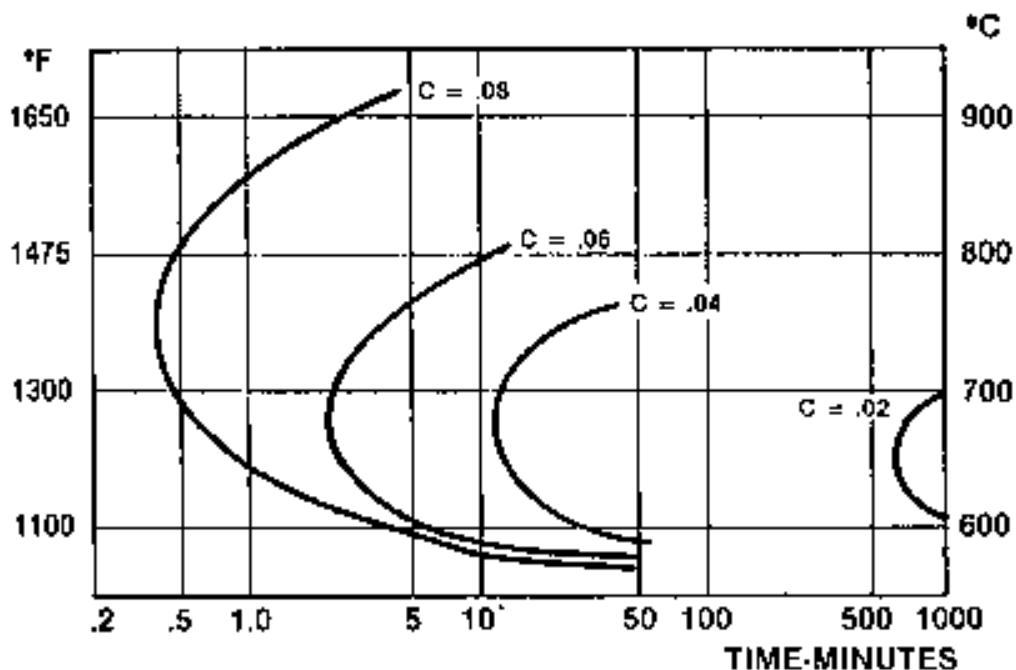


Fig. 11 Relación Tiempo-Temperatura para producir susceptibilidad a la Corrosión Intergranular en un acero 304 con varios contenidos de carbono

2) Un segundo método para evitar la precipitación de carburos de cromo consiste en realizar un calentamiento de redisolución de los carburos a una temperatura de 1050°C para luego y desde esa temperatura realizar un temple de retención de fase evitando que precipiten los carburos. Este tipo de solución es válida para partes que no deban calentarse en servicio en el rango de temperaturas donde se produce Sensitización (420-850°C). Este tipo de solución en general no se aplica a partes soldadas ya que las mismas suelen ser voluminosas (tanques) y de relativamente poco espesor lo que las hace difícil de templar, además los calentamientos a estas altas temperaturas podrían deformar el equipo.

3) Otro método para eliminar el problema del carbono en el metal base es especificar aceros Inoxidables que contengan Titanio o Niobio (Columbio). Ambos aleantes tienen una gran afinidad con el carbono y forman carburos preferencialmente con ellos dejando al cromo en solución. A los aceros inoxidables de este tipo se los denomina "Estabilizados" al Ti (tipo 321, donde  $\%Ti = 4x\%C$ ) o al Nb (tipo 347 donde  $\%Nb = 10x\%C$ , 1% max) según sea el aleante utilizado.

Debido a que el Ti se volatiliza en el arco eléctrico, en la soldadura de estos materiales se suele utilizar el tipo 347 (aleado con Nb) o el 308L (no estabilizado) como material de aporte.

El mecanismo es el siguiente: A 1050°C puede considerarse que la Austenita disuelve todos los carburos presentes en la estructura, ya sea los carburos de Cr de Fe de Ti o de Nb.

Si comenzamos a enfriar desde esta temperatura un acero estabilizado veremos que alrededor de los 900°C comienza a formarse el carburo de Ti (321) o el carburo de Nb (347) en cambio el carburo de cromo recién empieza a precipitar a una temperatura inferior (800°C).

Por lo tanto si solubilizamos todos los carburos a 1050°C y enfriamos lentamente en el rango de precipitación de carburo de Ti o Nb (900°C) permitiendo la precipitación de carburo de Ti o de Nb (según sea el acero utilizado) cuando lleguemos al rango de precipitación del carburo de Cr (800°C) ya no quedará carbono libre, debido a que todo el C precipitó en forma de carburo de Ti o de Nb.

Es interesante observar que es imprescindible en el caso de los aceros estabilizados que estos se enfríen lentamente en el rango de precipitación de carburo de Ti o Nb para permitir su formación. En caso contrario, si enfriásemos rápidamente en este rango no habría tiempo para la precipitación de carburos de Ti o Nb y luego a temperaturas más bajas se produciría la indeseable precipitación del carburo de Cromo. Esto es justamente lo que ocurre en la soldadura de estos aceros, veamos:

### 5.2.1 KNIFE LINE ATTACK (KLA)

Cuando un acero estabilizado se suelda, especialmente con SMAW (electrodo revestido), una muy fina (solo de algunos granos de ancho) y muy cercana capa de material base adyacente al cordón de soldadura se calienta a temperaturas superiores a 1050°C (en realidad debido a las grandes velocidades de calentamiento y a la propia inercia de la redisolución es necesario calentamientos un poco superiores (1230°C) para redissolver los carburos de Nb) con la consiguiente disolución de todos los carburos, una vez que el electrodo avanza esa zona se enfría demasiado rápidamente en el rango de formación de carburo de Ti o Nb impidiendo su precipitación. Esto ocurre especialmente en chapas de poco espesor. Esta zona, luego queda sensibilizada con las pasadas consecutivas, algún eventual tratamiento térmico o en servicio, ya que llega a la temperatura de precipitación del carburo de Cr teniendo todo el C disponible y precipitando carburo de Cr. Esta fina capa y una vez en servicio se corroe dejando a ambos lados del cordón y mucho más cerca de este, que el caso de corrosión intergranular convencional, una fina ranura corroída que por su parecido al corte que dejaría un cuchillo se llama Knife Line Attack (KLA).

El KLA puede evitarse simplemente calentando a la zona afectada a una temperatura superior a 815°C a partir de la cual los carburos de Cr comienzan a redisolverse e inferior a 1050°C donde la redisolución es completa, y luego enfriar lentamente. En general el Tratamiento Térmico Post Soldadura (TTPS) es localizado y se realiza a unos 900°C, máxima temperatura que se puede alcanzar con los calefactores eléctricos normalmente utilizados en TTPS.

### 5.3 ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS CON ALTO NITRÓGENO

Dentro de los Aceros inoxidable Austeníticos además de la característica serie 300 se encuentra la serie 200 en la que se reemplaza algo de Ni por nitrógeno. La principal diferencia en comportamiento mecánico es que la resistencia a la fluencia de los aceros de la serie 200 es entre un 50 y un 100% mayor que la resistencia a la fluencia de los aceros de la serie 300. La resistencia a la tracción también es mayor pero solo en aproximadamente un 20%.

### 5.4 ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS ENDURECIBLES POR PRECIPITACIÓN

Los aceros inoxidable endurecibles por precipitación están clasificados por UNS por las series 100, 350, 360, 450 y 455. Su uso es muy acotado, el fabricante lo entrega con el tratamiento térmico ya realizado. Los hay de estructura Austenítica, Martensítica y Semiaustenítica. Los Martensíticos y Semiausteníticos son Austeníticos a alta temperatura. Los Martensíticos templan a  $M_s$  entre  $100^{\circ}\text{C}$  y  $150^{\circ}\text{C}$  mientras que para los semiausteníticos  $M_s$  se encuentra debajo de  $T_{amb}$  ( $-70^{\circ}\text{C}$ ). En este caso para inducir la transformación Martensítica se puede temprar hasta  $-100^{\circ}\text{C}$ , deformar plásticamente en frío o calentar a  $650^{\circ}\text{C}/850^{\circ}\text{C}$  para precipitar carburos de los aleantes y así disminuir la cantidad de estabilizantes de la fase Austenítica y elevar  $M_s$ .

Son aceros con entre 12% y 18 % de Cr y entre 4 % y 9 % de Ni además de los aleantes que producen el endurecimiento por precipitación que suelen ser Mo, Ti, N, Cu, Al, Ta, Nb, B, y V.

Se los utiliza en ciertas aplicaciones a alta temperatura como ser intercambiadores de calor y tubos del sobrecalentador de calderas de vapor.

### 5.5 ACEROS INOXIDABLES DUPLEX

Por último esta la serie de aceros Duplex 312, 315, 318 325 y 329. Son aleaciones base Hierro con Cr y Mo, con suficiente cantidad de estabilizadores de la Austenita, Ni y N para lograr el balance entre Ferrita y Austenita. El resultado es una adecuada combinación de estas dos fases, la Austenita confiere ductilidad y la Ferrita resistencia a SCC. El Mo hace mas resistente a la capa pasivante y mejora la resistencia al pitting.

Los carburos de Cr tienden a precipitar en la interfase Ferrita-Austenita pero obteniendo el Cr de la Ferrita en donde la difusión es más rápida y la homogeneización del Cr en la misma es mayor que si fuese Austenita y por lo tanto la disminución de la concentración de Cr en el borde de grano no es tan pronunciada impidiendo la Corrosión Intergranular.

Consecuentemente los Aceros Duplex son usados en las más severas condiciones de temperatura y contenido de cloruros donde los Inoxidable Austeníticos sufren SCC, Pitting y Crevice Corrosion.

Recordemos que los aceros Inoxidable totalmente Ferríticos generalmente resisten la SCC mejor que los Austeníticos. Pequeñas adiciones de Ni aumentan la susceptibilidad a SCC.

Los Aceros Inoxidable Duplex son aceros con más Cr para mantener la resistencia a la corrosión de los aceros Austeníticos y menos Ni para aumentar el contenido de ferrita con el objeto de aumentar la resistencia a SCC en medios con cloruros a alta temperatura. Por lo tanto los aceros duplex son más resistentes a SCC que los Austeníticos pero no totalmente inmunes.

Los Aceros Inoxidable duplex son aceros con una resistencia a SCC intermedia entre los Austeníticos y los Ferríticos, la que disminuye con el trabajado en frío.

Estos Aceros tienen mas tenacidad que los Ferríticos, debido a ello se los consigue en forma de chapa que se suelen usar para fabricar la placa-tubo de los intercambiadores de calor.

Como desventaja se observa que para contenidos similares de Cr y Mo su resistencia a Crevice Corrosion es algo menor que los aceros Ferríticos o Austeníticos.

## 6. FISURACION EN SOLDADURA DE INOXIDABLES AUSTENITICOS

**L**a Fisuración Inducida por Hidrógeno (HIC) no es un problema en los aceros Inoxidables Austeníticos debido a su baja resistencia mecánica (baja dureza), solo cuando están deformados plásticamente en frío puede presentarse HIC. Podría tenerse en cuenta para el caso de aceros disímiles cuando haya aceros Ferríticos en la junta soldada.

En general no se obtienen beneficios con el precalentamiento (PC) de la soldadura de estos aceros sino más bien un deterioro de la resistencia a la Corrosión Intergranular como consecuencia de la precipitación de carburos de Cromo en borde de grano.

Además el PC aumenta el riesgo de fisuración en caliente y a la distorsión por su mayor coeficiente de dilatación con respecto a un acero Ferrítico.

Es práctica generalizada en la Soldadura de los aceros Inoxidables Austeníticos mantener la temperatura del material base (y la ZAC) lo más baja posible, esto se logra usando bajas intensidades de corriente (compatibles con una adecuada penetración y fusión), arco corto, secuencia de paso peregrino, cordones cortos, o simplemente esperando que la pieza se enfríe entre cordón y cordón. Es una práctica corriente limitar la temperatura a valores donde el material pueda tocarse con la mano (70°C).

Como excepción y rara vez puede ser requerido un calentamiento a 500°C con el objeto de producir precipitación de carburos (de Nb) en aceros inoxidables AISI 347 estabilizados al Nb (Niobio) (en EEUU Columbio) o en aleaciones de Ni (Níquel) de una manera controlada para evitar la precipitación de los mismos en servicio produciendo fragilidad.

Este último Tratamiento se realiza si fuese necesario mediante un Tratamiento Térmico Post Soldadura (TTPS).

### 6.1 FISURACION EN CALIENTE Y la influencia DE LA FERRITA d

**B**ajo condiciones de alta restricción a la contracción, algo frecuente en juntas soldadas de Aceros Inoxidables suelen aparecer pequeñas fisuras distribuidas al azar cuando el material se encuentra a alta temperatura (1000°C). A menudo estas fisuras no son visibles pero un ensayo de plegado de cara las pone en evidencia como rupturas del material no mayores a tres mm de longitud. Son llamadas microfisuras.

El por qué algunas soldaduras exhiben esta tendencia a la Fisuración en Caliente y otras no ha sido tema de estudio desde los años '50.

Se comprobó que si pequeñas (2-3%) cantidades de Ferrita d, solución sólida de carbono en Hierro bcc, acompañaba a la predominante Austenita se aumentaba la posibilidad de producir soldaduras sanas, sin Fisuración en Caliente.

El mecanismo de fisuración parece ser el resultado de la ruptura de una película intergranular líquida de bajo punto de fusión (1100-1200°C) durante la contracción que tiene lugar cuando una estructura totalmente Austenítica se enfría desde su temperatura de fusión (1420-1450°C). Los 250-300°C de diferencia producen tensiones de tracción cuando hay restricción a la contracción. La presencia de pequeñas cantidades de Ferrita d provee un número de remedios:

.-Se incrementa la cantidad de borde de grano disponible reduciendo de esta manera la concentración de impurezas que quedan segregadas en el borde de grano.

.-La Ferrita disuelve más fácilmente que la Austenita elementos Aleoalógenos como Fósforo y Azufre y Silicio reduciendo de esta manera la influencia de estas perniciosas impurezas que segregan en borde de grano Austenítico.

Cuando en el rango de temperaturas antedicho la Austenita, mas resistente se esta contrayendo, la Ferrita mas dúctil compensa la contracción deformándose plásticamente y evitando la Fisuración en Caliente de naturaleza intergranular.

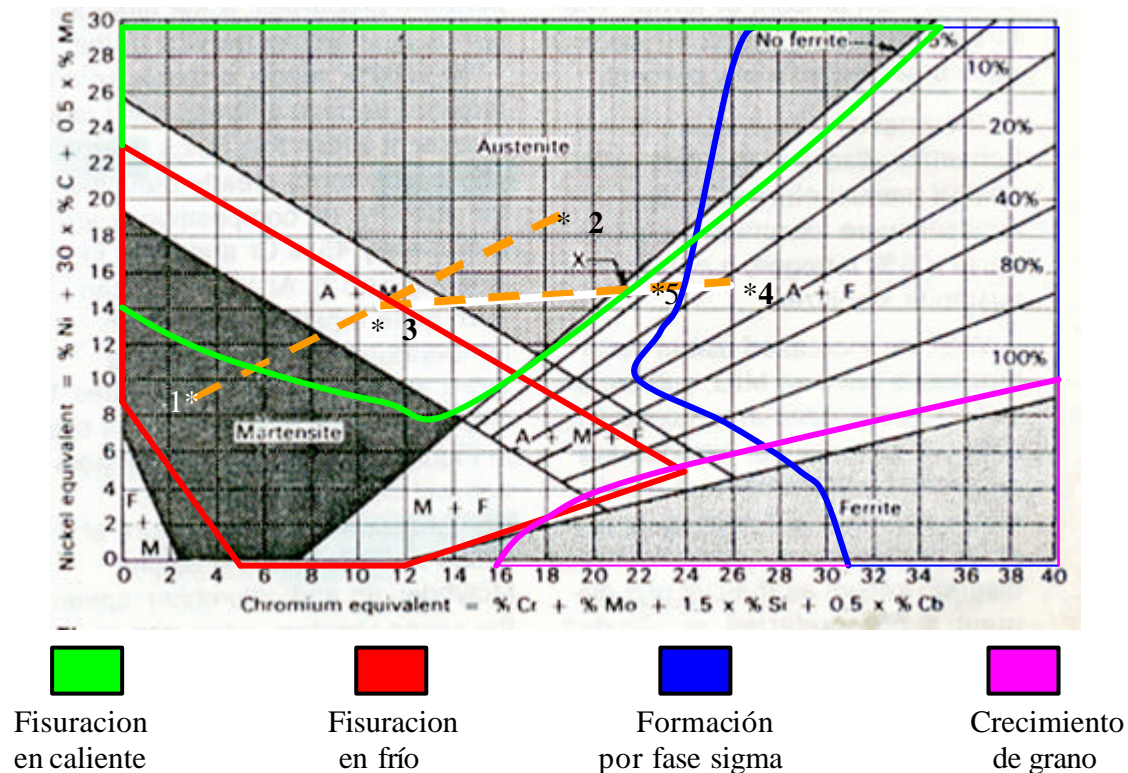


Fig 12. Diagrama de Shaeffler

## 6.2 DIAGRAMA DE SHAEFFLER

El diagrama de Schaeffler, (Fig 12) procede de su antecesor, el diagrama de Maurer (Fig 12bis) que muestra las estructuras que va a presentar un acero al Cr-Ni de acuerdo a los porcentajes verdaderos de Cr y Ni.

Antón Scheaffler lo mejoró en el sentido de tener en cuenta las propiedades Alfagenas de los elementos de aleación con el equivalente en Cr y las propiedades Gammagenas con el equivalente en Níquel por intermedio de coeficientes de equivalencia. Tabla XX.

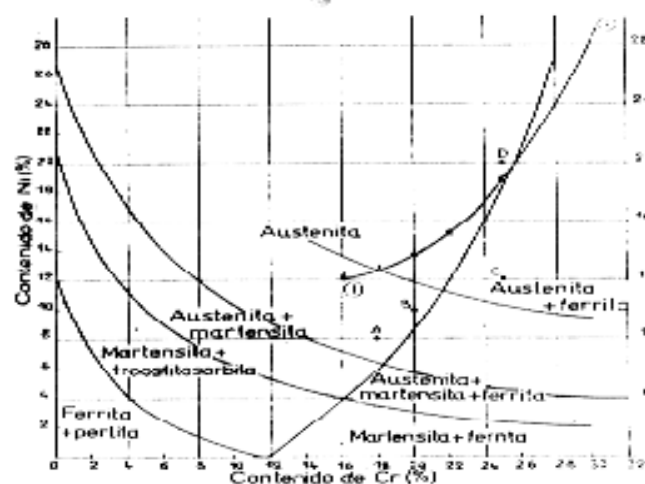


Fig Diagrama de Maurer, predecesor del diagrama de Schaeffler



El diagrama de Schaeffler muestra claramente el dominio de las fases Ferrítica, Martensítica y Austenítica propias de los Aceros Inoxidables cuando son enfriados a las velocidades de soldadura.

Además, en distintos colores, muestra las zonas de fragilización en Frío debido a la presencia de Martensita (Rojo), la zona de Fragilidad en caliente originada por la presencia de Austenita (verde), la zona de Fragilidad por presencia de fase Sigma (Azul) y la zona de Crecimiento de grano Ferrítico (Fucsia)

Cuando es necesario soldar aceros inoxidables, dos son las condiciones necesarias:

- 1) que la composición química de la soldadura sea similar a la del material base con el objeto de resistir a la corrosión.
- 2) Que la estructura tenga las características mecánicas apropiadas

La condición segunda depende de en que punto del diagrama se ubique el metal de soldadura que es una mezcla de los materiales base que no olvidemos pueden ser distintos (soldaduras disímiles) y del material de aporte.

Para la determinación de este punto se procede de la siguiente manera:

.- Se determinan el equivalente en Cr y el equivalente en Ni a partir de la composición química y los coeficientes de equivalencia de la tabla XX para cada uno de los materiales base y se los posiciona en el diagrama. Por ejemplo puntos 1 y 2 si vamos a soldar un acero Martensítico (1) con un Austenítico (2).

.-Estos dos puntos se unen con una recta, y si los dos materiales base participan en la misma proporción (igual espesor, igual bisel y arco simétricamente orientado) el punto medio de la recta representará a la mezcla de los dos materiales base. Punto 3.

.-Ahora bien, si tenemos en cuenta el agregado del material de aporte, este también tendrá asociado un punto del diagrama. Punto 4.

.-Si unimos el punto medio de la recta (Punto 3) de los materiales base con el punto que representa el material de aporte (Punto 4) podemos suponer sin equivocarnos que el punto representativo de la mezcla final de los tres materiales deberá estar sobre esta recta, mas lejos o mas cerca del material de aporte en función de la proporción de material de aporte con respecto al material base fundido que le entreguemos, lo que a su vez es función del proceso de soldadura y sus parámetros (intensidad de corriente, longitud de arco, etc.).

En general, para un proceso de soldadura con electrodo revestido (SMAW) se acostumbra a dividir esta última recta en 10 partes y posicionar el punto final para un 80% de material de aporte y un 20% de materiales base. (Punto 5).

Las propiedades mecánicas del metal de soldadura dependerán de la posición dentro del diagrama de Schaeffler del Punto 5. Este punto deberá evitar cualquiera de las cuatro zonas coloreadas, como se observa del diagrama de Schaeffler. En realidad la zona del mismo con estructuras tenaces es relativamente pequeña, pero si deseamos un metal de Soldadura Tenaz debemos elegir cuidadosamente al material de aporte para que balanceado con los materiales base se sitúe indefectiblemente en dicha zona.

La zona mas apreciada como ya vimos anteriormente es la de Austenita con entre un 5% y un 10% de Ferrita.

Mediante el uso de este diagrama de fases, los fabricantes de materiales de aporte para soldadura balancean los elementos de aleación para, con los materiales base del mercado, producir depósitos Austeníticos con contenidos de Ferrita de entre 5 y 10 %.

En el eje vertical, llamado Equivalente en Níquel están los elementos de aleación Gammagenos, carbono, níquel y manganeso. Ya que su influencia no es igual están afectados por un factor.  
En el eje horizontal se muestra el Equivalente en Cromo donde están los elementos Alfágenos Cromo, molibdeno, Silicio y Niobio (llamado Columbium en EEUU) cada uno con el factor correspondiente.

Cromo equivalente	$\%Cr + \%Mo + 1,5x \% Si + 0,5x \% Nb$
Níquel Equivalente	$\% Ni + 30x \% C^{**} + 0,5x \% Mn$

\*\* En el caso de aceros al carbono es necesario considerar la decarburación que se produce durante la Soldadura que alcanza valores de alrededor del 50%, por lo que en la fórmula del Níquel Equivalente se reemplaza el coeficiente  $30x \%C$  por  $15x \%C$ .

El área de especial interés es la zona bifásica, de Ferrita más Austenita donde la exactitud de este diagrama es de aproximadamente 4% de ferrita.

Ya que la ferrita es magnética y la Austenita no, la cantidad de ferrita en una soldadura puede verificarse midiendo su atracción magnética, la que es directamente proporcional a la cantidad presente.

Hay varios instrumentos disponibles para esta medición. Uno, el Severn Gauge que compara densidades y de esta manera aísla las cantidades de ferrita.

Otro es el Magna Gauge que mide la tensión requerida por un resorte para separar a un imán de la soldadura. La fuerza necesaria es relacionada con el porcentaje de Ferrita. Este equipo es más exacto pero está limitado como instrumento de laboratorio mientras que el Severn Gauge se puede aplicar en fábrica y obra.

Aunque no totalmente, el Diagrama de Schaeffler el Severn Gauge y el Magna Gauge son lo suficientemente exactos para indicar la presencia del porcentaje máximo o mínimo deseado de ferrita. Los tres métodos se confirman uno al otro dentro de un error admisible.

El trabajo original de Antón Schaeffler fue realizado con soldadura manual con electrodos revestidos, SMAW, donde se asumía que los depósitos contenían alrededor de 0,06% de nitrógeno un potente estabilizador de Austenita (gammageno).

Con el incremento del uso de otros procesos de soldadura como MIG, Arco Sumergido, Sistemas auto protegidos (open-arc, Flux cored), se incorporan del aire atmosférico al metal fundido diferentes cantidades de nitrógeno haciendo necesario incluir al nitrógeno como un elemento más con el factor correspondiente.

En estos casos es preferible utilizar una revisión del diagrama de Schaeffler, llamado diagrama de De Long a la hora de tener en cuenta la influencia del N de igual poder que el carbono.

La Ferrita se distribuye uniformemente en la matriz austenítica, la medición por medios magnéticos de la misma corresponde a un área y es el promedio de la misma. Por esta razón es incorrecto referirse en términos de porcentaje. Convencionalmente se acordó denominarla en términos de "Número de Ferrita" o FN. Estos números se mantienen igual desde 0 a 8 pero se los denomina Número y no porcentaje. Por encima de 8 los NF se hacen mayores que los porcentajes del diagrama de Schaeffler, para reflejar la calibración más exacta de los instrumentos utilizados en los estudios respaldados por el Welding Research Council.

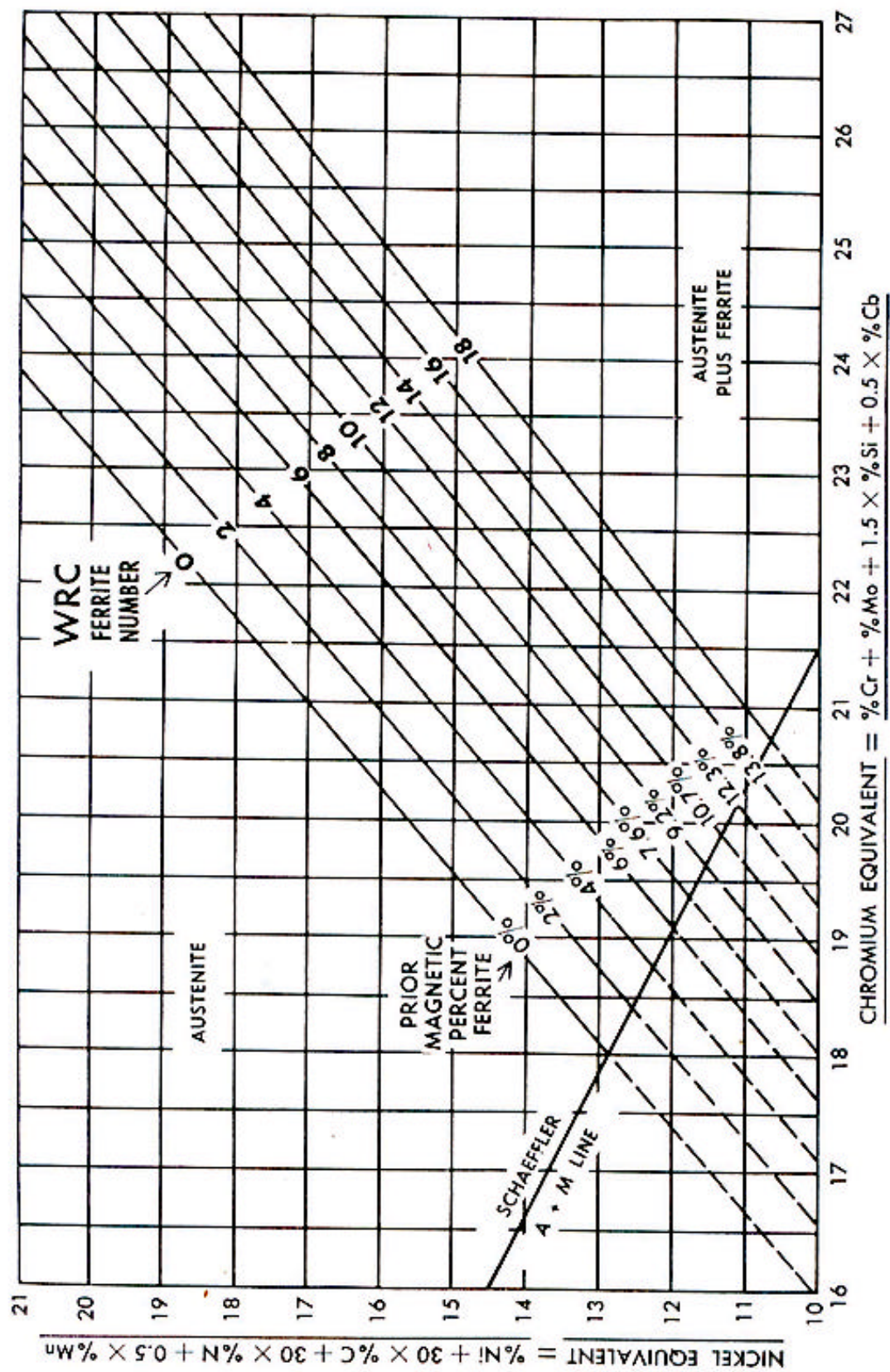


Fig 13. Diagrama de DeLong



### 6.3 FORMACION DE FASE SIGMA

Vimos que una pequeña cantidad de Ferrita evita la fisuración en Caliente, también debemos agregar que se mejora además la resistencia mecánica y algunas veces la resistencia a la corrosión. La cantidad de ferrita no conviene que sea mayor que 12-15 % debido a que ella, como ya vimos en el diagrama Fe-Cr, se transforma en Fase Sigma, aumentando los riesgos de fisuración como así también disminuyendo la resistencia a la corrosión.

Si la parte a ser fabricada es destinada a un servicio entre 550-950°C, o si tiene especificado un Tratamiento Térmico Post Soldadura, puede formarse Fase Sigma reduciendo la ductilidad. La composición de la fase Sigma es de aproximadamente 45% Cr -55Fe. A 730°C se forma rápidamente, pero a mas bajas temperaturas los tiempos se incrementan (Fig. 3 y Fig. 13)

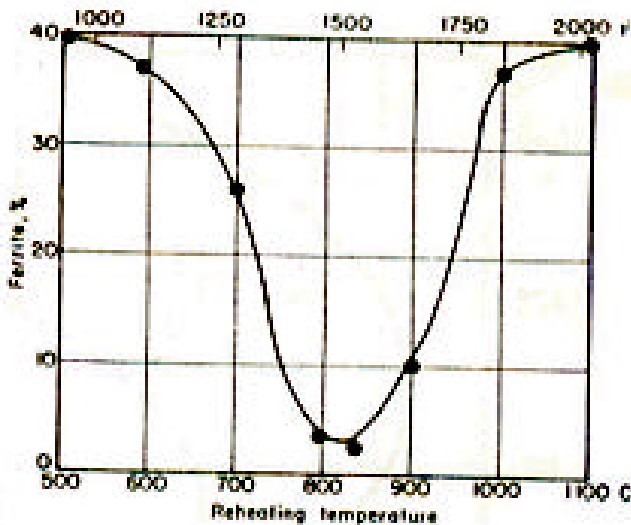


Fig. 14. Porcentaje de Ferrita transformada  
En fase Sigma con la Temperatura

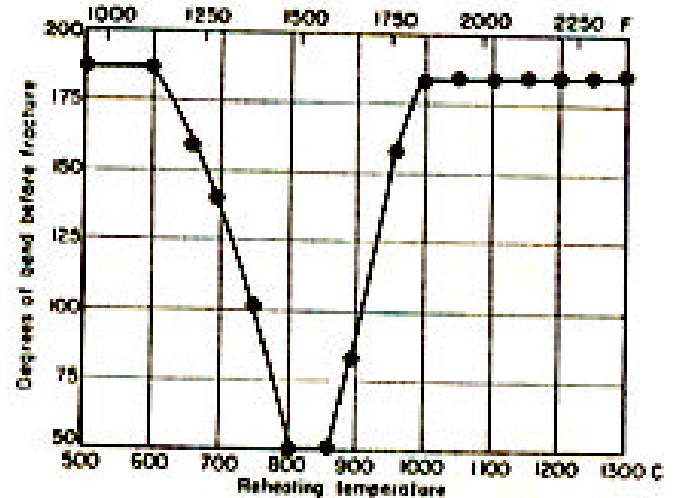


Fig. 15. Pérdida de ductilidad en función  
de la temperatura de calentamiento

La influencia en la ductilidad se ve en la Fig.14. Los aleantes modifican la velocidad de formación de fase Sigma y en la temperatura a la que la reacción comienza.

El Molibdeno y el Niobio aceleran la reacción formadora de fase Sigma, mientras que el níquel eleva la máxima temperatura a la que todavía la fase sigma está todavía presente.

El Hierro disuelve grandes cantidades de cromo y, a causa de la micro segregación, la ferrita en el borde de grano contendrá usualmente suficiente cromo para convertirse en Sigma con una mínima difusión.

Una vez formada, la fase Sigma solo podrá ser removida con un calentamiento de redisolución a 1050°C. La fase Sigma es no magnética, y la cantidad de fase Sigma formada durante un calentamiento dado puede ser fácilmente determinada si se conocen las cantidades de ferrita antes y después del calentamiento.

Debido a esta transformación de ferrita a fase Sigma, las partes que sean sometidas a calentamientos ya sea en servicio o durante el proceso de fabricación, como ser Tratamiento Térmico Post Soldadura el contenido de ferrita se limita a 12-15%.

## 7. TERMINACION SUPERFICIAL

**D**ebido al valor estético y a veces para mejorar su resistencia a la corrosión estos aceros deben ser pulidos tanto en el material base como en las juntas soldadas para mantener la continuidad superficial. La terminación superficial suele realizarse con discos abrasivos para rectificar la superficie y por intermedio de granallado (blasting) para remover la coloración en las áreas adyacentes a la soldadura.

### 7.1 PULIDO

**S**e utilizan discos abrasivos gruesos (20 a 36) seguidos de sucesivos discos mas finos hasta conseguir el mismo acabado del material base.

Como en todo tipo de pulido, ningún paso debe dejar ralladuras anteriores para ser removidas en pasos subsiguientes (con discos más finos).

La operación final de pulido debe ser paralela a la dirección de laminado y pulido del material base.

Una forma de lograr que no se note la soldadura es terminar de pulir la soldadura con una terminación mas fina que la del metal base, seguida de una más gruesa y similar a la que tiene el material base.

Se utilizan discos oxido de aluminio o de carburo de silicio y en el pulido final para prevenir el golpeteo de la herramienta se prefiere usar discos con cuerpo de goma.

### 7.2 DECAPADO

**L**a exposición al aire y a altas temperaturas que produce la soldadura genera óxidos coloreados y a veces hasta de color negro. Diferentes óxidos se forman a diferentes temperaturas y un solo acido no puede removerlos a todos ellos.

Para óxidos finos, de colores suaves, se utiliza ácido nítrico ( $\text{NO}_3\text{H}$ ) al 10-15% con 0,5 a 3% de acido fluorhídrico (FH) a una temperatura de 50-60°C (Pickling).

*El FH es el ingrediente activo y el acido nítrico al ser un agente pasivante, actúa como inhibidor para proteger las áreas ya limpias. El tiempo de exposición se determina por la periódica observación de la superficie. Un tiempo excesivo producirá ataque.*

Para películas gruesas de óxido son frecuentemente removidas con acido sulfúrico ( $\text{SO}_4\text{H}_2$ ) al 8-10% a una temperatura algo mayor (65-75°C) durante 5 a 10 minutos. Se debe realizar un lavado final, preferentemente con cepillo o esponja, seguido por un decapado con acido nítrico-acido fluorhídrico (pickling).

Todo tratamiento con acido debe ser seguido por un lavado con agua limpia para remover cualquier resto de ácido.

### 7.3 BLASTING

**E**l bombardeo con partículas, por intermedio de un chorro de aire es un método rápido y efectivo para remover los óxidos negros o coloreados. Es preferible usar arena base sílice.

Si la arena esta contaminada con partículas de oxido, este quedará incrustado en la superficie del metal perjudicando su apariencia. Si se utilizan partículas de acero estas también pueden quedar incrustadas en el metal por ello se suele, después de esta remoción mecánica, realizar un tratamiento con acido (15%  $\text{NO}_3\text{H}_2$  +1%FH) para evitar manchas de oxido y picaduras. Un lavado final con agua es imprescindible

para remover cualquier resto de ácido. Si se utiliza perdigones de acero es recomendable que estos sean de Acero Inoxidable.

Se debe tener cuidado con chapas de Acero Inoxidable finas, debe evitarse el Blasting ya que puede producirse distorsión por la deformación plástica localizada debida a la energía cinética de las partículas abrasivas.

También debe prevenirse un excesivo deterioro superficial localizado manteniendo el flujo de partículas en movimiento. Una variable importante es el ángulo de incidencia del chorro abrasivo, para materiales dúctiles como los aceros Austeníticos y Ferríticos ángulos de incidencia cercanos a  $90^\circ$  (chorro casi perpendicular a la chapa) son los que menos desgaste producen. En cambio para aceros duros ( $>HRC50$ ) el máximo desgaste se producirá para ángulos de incidencia pequeños ( $<45^\circ$ ).

## **8. PROBLEMAS COMUNES DE LA SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES Y SU SOLUCION**

Si bien esta es una publicación sobre Aceros Inoxidables y no sobre Soldadura, la misma se encuentra casi siempre presente cuando se usan Aceros Inoxidables ya que estos se utilizan usualmente para fabricar tanques, cañerías, reactores, etc., todos ellos fabricados por soldadura. Por ello haremos una breve descripción de problemas comunes a los Aceros Inoxidables y su soldadura.

Cuando se sueldan aceros al carbono la consideración principal es la resistencia mecánica de la unión soldada. El material de aporte puede ser de cualquier composición química mientras conserve las propiedades mecánicas del material base. La apariencia y resistencia a la corrosión de la junta son consideraciones secundarias.

Todos los Aceros Inoxidables Austeníticos, tienen en general propiedades mecánicas comparables, y por lo tanto de consideración secundaria con respecto a la resistencia a la corrosión y apariencia.

Mientras que la resistencia de una junta representa los valores promedio de un volumen importante de material, la corrosión puede tener lugar en áreas tan pequeñas como una picadura donde la causa puede ser la contaminación, cantidad de impurezas en el material, etc.,

Como en muchos ordenes de la vida la forma más simple de resolver problemas es prevenir su ocurrencia. La mayoría de los defectos en los Aceros Inoxidables son el resultado de no seguir procedimientos apropiados y comprobados y no por que los Aceros Inoxidables sean diferentes de los más familiares Aceros al carbono. Es tan fácil seguir malos hábitos como seguir buenos hábitos, y las siguientes son reglas comprobadas que si son seguidas se transforman en buenos hábitos y concluyen en resultados satisfactorios o sea un producto de calidad.

### **8.1 Usar productos de calidad**

La calidad de la materia prima, tanto chapa, caños o tubos, y materiales de aporte deben conformar ciertos niveles de calidad especificados ya sea por AWS, ASME o MIL-E-22200/2ª o alguna otra norma. Es una falsa economía ahorrar en las materias primas que producirán indefectiblemente defectos que deberán repararse o una vida útil en servicio reducida.

Las soldaduras de un Acero Inoxidable serán ensayadas por Gamma grafía o ultrasonido para asegurar una junta sana. Un cuidadoso procedimiento de Soldadura es esencial para minimizar las indicaciones de defectos, los que deberán ser removidos. La reparación de una soldadura eleva el costo alrededor de tres veces, la primera vez se paga por hacer la soldadura defectuosa, la segunda se paga por removerla con amolado o mecanizado y la tercera por realizarla nuevamente esta vez correctamente. Pareciera que siempre hay tiempo y medios para realizar algo correctamente la segunda vez.

### **8.2 Diseño de junta**

Es esencial un diseño de junta apropiado, una junta muy angosta dificulta el acceso del electrodo o material de aporte e impide una correcta remoción de la escoria. Por el contrario una junta muy ancha requiere mucho material de aporte y eso aumenta el costo de la soldadura. Un ángulo de 60° es considerado correcto excepto para secciones gruesas que se utiliza la junta en U o tipo tulipa. La separación de los bordes en la raíz debe ser igual al diámetro del electrodo.

### 8.3 Forma y disposición de los cordones de soldadura

Deben evitarse los cordones cuya sección sea demasiado puntiaguda o demasiado plana. Esto produce poca penetración e inclusiones o "slag pockets" los que serán revelados por radiografía.

Las inclusiones de escoria en algunas áreas causan que la soldadura falle en el ensayo de plegado. El paso de la onda o ancho del cordón no deberá ser de más de 2,5 veces el diámetro del electrodo. Por supuesto la intensidad de corriente y el voltaje deben ser los apropiados y deben estar especificados en el procedimiento de soldadura.

### 8.4 Un buen diseño de junta permite una fácil remoción de la escoria

Las juntas deben diseñarse con suficiente espacio para poder remover la escoria fácilmente. La escoria de electrodos AC-DC rutílicos usualmente se rompe en trozos grandes en cambio los electrodos básicos se rompen en partículas pequeñas mas difíciles de eliminar. Por ello se prefieren soldaduras con perfiles lisos, sin anfractuosidades lo que hace del trabajo de cepillado más fácil. Se suelen utilizar para esta tarea, puntas agudas acompañadas de cepillos de acero inoxidable.

### 8.5 Humedad

La fuente mas obvia es el agua, suele producir porosidad produciendo el rechazo de la unión soldada. El agua utilizada para enfriar la soldadura de inoxidable rara vez produce problemas por que el soldador se asegura que este seco antes de seguir con la soldadura. Una fuente de humedad menos obvia que debe ser considerada son guantes húmedos o transpirados, trapos húmedos, derrames de bebidas sobre la soldadura, mangueras que pierden agua, mangueras de aire utilizadas para sopletear la escoria. Con respecto a estas ultimas, en condiciones de mucha humedad, hay condensaciones de agua en el tanque del compresor, en el sistema de provisión de aire comprimido o en la manguera y el soldador inadvertidamente puede pulverizar agua sobre la junta. También hay que prevenir cuando hay grandes variaciones de temperatura ambiente que produzcan condensación.

Otro problema es la naturaleza higroscópica del revestimiento de los electrodos inoxidables. Los expertos aseguran que electrodos de bajo hidrógeno no deben exponerse a un ambiente de 50% o más de humedad relativa por un período de tiempo superior a dos horas. Si esto ocurre el revestimiento absorbe humedad produciendo soldaduras defectuosas. La primera indicación es la remoción dificultosa de la escoria y la segunda es la porosidad visible. Una costumbre es proporcionar al soldador una cantidad de electrodos suficiente para dos horas e trabajo manteniendo el resto del material en el horno.

La humedad sobre todo en la noche puede ser un problema, si esta es alta puede producirse condensación en las paredes del bisel especialmente si la chapa o cañería es introducida en un ambiente mas calido desde el exterior frío. Si la humedad no es removida calentando con una torcha o con sopleteo con aire seco antes de soldar se producirá dificultad en la remoción de la escoria y porosidad.

Una vez que el paquete de electrodos se ha abierto y estos expuestos al aire, los electrodos que no estén en uso deben colocarse en hornos para mantenerlos secos para su posterior uso.

Los electrodos a usarse se colocan en hornos portátiles (termos). Usualmente los electrodos expuestos al aire deben ser re-horneados a 175°C-200°C por una hora para restaurar un apropiado nivel de humedad. Si algún electrodo ha sido inmerso en agua accidentalmente debe desecharse.

## 8.6 Contaminación

Los Aceros Inoxidables pulidos son protegidos con papel adhesivo. Cuando se retira el papel es necesario limpiar los restos de adhesivo con un solvente tal como el percloroetileno ya que el calor de la soldadura puede producir gases con la combustión del adhesivo generando porosidad.

Hechos como el comentado, y otros como el azufre presentes en los lubricantes de mecanizado pueden, además de causar porosidad y fisuración, incrementar el porcentaje de C o S algo que el fabricante trata de minimizar en los aceros inoxidables para ver que luego irónicamente una mala práctica de soldadura produce contaminación.

## 8.7 Fuentes de carbono

Las fuentes de contaminación con carbono en los talleres de soldadura son :

Pinturas, lacas, compuestos antiespattering, y el siempre tan peligrosamente cerca de la soldadura, lápiz para escribir sobre metal de base grasa o cera. Las identificaciones o instrucciones escritas con tales lápices deben removerse antes de soldar para evitar contaminación de la soldadura.

## 8.8 Limpieza

Ya hemos hecho notar que es importante la remoción de la escoria para evitar que quede atrapada entre las capas de soldaduras multipasadas. También es importante la limpieza del cordón una vez finalizada la soldadura y antes que esta abandone el taller.

Se han visto grandes manchas de óxido que producen una reacción muy negativa en el cliente. Una fuente común de contaminación son las diminutas partículas de acero al carbono esparcidas por el aire por los discos de amolar en áreas adyacentes.

Las soldaduras de Aceros Inoxidables que contienen ferrita se tornan electromagnéticas a causa de la polarización de la soldadura por efecto de la corriente continua del proceso de soldadura.

La fase Ferrítica, ferromagnética atrae las partículas de hierro, creando una concentración sobre o a los lados del cordón de soldadura. Cuando estas se exponen a la humedad de la noche se oxidan creando manchas amarillentas color “óxido”, un cepillado con cepillos de acero inoxidable o un lavado con ácido nítrico diluido vuelve a darle a la soldadura su apariencia normal.

Ya hemos dicho que los Aceros Inoxidables resisten la Corrosión gracias a una fina, adherente y tenaz película de óxido hidratado de Cromo, que se forma por la exposición del material al oxígeno del aire.

Ahora bien, si quedase algo de escoria o Flux residual sobre la soldadura, y la soldadura entrara en servicio con la presencia de algún líquido corrosivo no oxidante, este Flux eventualmente podría ser removido dejando bajo el un área que nunca fue expuesta al aire y por lo tanto sin la película protectora, la que será corroída rápidamente.

Muchas picaduras en soldadura son debidas a residuos de Flux que quedan luego de una limpieza incorrecta luego de la soldadura.

## 9. OCHO CONSEJOS UTILES PARA SOLDAR ACEROS INOXIDABLES

**P**ara obtener una radiografía clara es necesario que la superficie de la soldadura este libre de irregularidades. Debe removerse toda traza de suciedad, grasa o materia extraña por intermedio de decapado, desengrasado, mecanizado o amolado. Debe usarse exclusivamente cepillos de acero inoxidable para evitar contaminación. El Oxicorte y el Arc-air utilizados para crear el bisel deja una capa de oxido la que debe ser removida por amolado antes de soldar.

**P**ara soldadura plana el electrodo debe mantener un ángulo de 15° y la parte superior inclinada en el sentido de avance. El arco debe mantenerse lo mas corto posible. Para soldadura vertical el electrodo debe mantenerse perpendicular a la chapa y usarse una leve oscilación en la pasada de raíz. Para soldadura sobre cabeza el depósito debe realizarse en cordones rectos y cortos. Debe mantenerse el arco corto y debe evitarse oscilación.

**P**ara una mejor resistencia a la corrosión el depósito debe realizarse con la intensidad de corriente mínima y con cordones rectos (sin peinado). Cordones rectos minimizan el Calor Aportado y reducen la tendencia a la fisuración. Si debiese utilizarse peinado este debe limitarse a 2,5 veces el diámetro del electrodo. Siempre se debe llenar los cráteres antes de cortar el arco.

**U**na corriente muy baja producirá un arco inestable, acompañado de pegado del electrodo interferencia de la escoria en el arco, excesivo salpicado (spattering) y una incorrecta forma del cordón. Un amperaje demasiado alto y/o un arco demasiado largo producirán un salpicado excesivo con pérdida de material, fisuras en el cordón, “Under-Cut”, un bajo control de la pileta, una dificultosa remoción de la escoria y una pérdida de resistencia a la corrosión por perdida de cromo.

**U**na difícil remoción de la escoria puede ser causada por contaminantes en el material base, soldaduras irregulares, absorción de humedad por el revestimiento y juntas demasiado angostas para permitir un martillado efectivo. Todas las soldaduras deben enfriarse algo antes de comenzar a remover la escoria.

**L**a fisuración en los Aceros Inoxidables puede ser causada por varios factores, incluyendo: Cráteres sin llenar – Un arco demasiado largo al comenzar y terminar una soldadura – Sobre calentamiento de la pieza a soldar – Una excesivamente alta velocidad de avance – Un diseño de junta incorrecto – Elección de un electrodo incorrecto. La mayoría de las veces el problema estriba en una demasiado alta temperatura de la pieza o en cráteres sin llenar antes de cortar el arco.

**N**o se requiere una penetración profunda, ya que en el caso de Aceros Inoxidables estos están limpios y lisos y no se requiere una gran fuerza del arco para producir una buena penetración. Solo se necesita una suficiente penetración para sellar la raíz y el espacio entre la última pasada y el bisel. Mas penetración que esta puede causar problemas sin ofrecer ventajas.

**F**isuras descubiertas por RX deben evaluarse individualmente. El seguimiento del procedimiento de soldadura apropiado produce cordones lisos y densos donde la escoria puede removerse totalmente con facilidad, dejando una superficie limpia para recibir la pasada siguiente. Para asegurar la calidad radiográfica debe removerse toda la escoria y eliminarse las depresiones (por amolado si fuese necesario) antes de dar por terminada la soldadura.

## 10. CONCLUSION

Las consideraciones más específicas que podemos hacer acerca de los Aceros inoxidables son las siguientes:

- Los aceros Inoxidables solo son Inoxidables en medios oxidantes como lo es precisamente la atmósfera terrestre. Este hecho particular los hace parecer, erróneamente, universalmente Inoxidables.

- Los Aceros Inoxidables, desde el punto de vista de la corrosión, no se comportan como los metales nobles. No son nobles, son reactivos, lo que ocurre es que la película de productos de la corrosión que se forma sobre la superficie, se adhiere tan fuertemente, es tan continua, impermeable, etc., que lleva al material a un estado que se llama pasivo cuyo comportamiento frente a medios oxidantes es similar a el de los metales nobles.

- Cuando se selecciona un Acero Inoxidable deben preverse exactamente las condiciones de servicio, cualquier pequeña variación por insignificante que parezca (tanto cuantitativamente como cualitativamente) puede producir fracasos, a veces espectaculares.

- Si bien el conocimiento Teórico acerca de las causas de la Corrosion es mucho, tantas son las variables que intervienen en el comportamiento de los materiales que la previsión debe realizarse empíricamente por intermedio de ensayos en diferentes situaciones, ya que la extrapolación de resultados muchas veces induce a errores

- Por último recordemos que cuanto mas “Inoxidable” sea una aleación (por pasivación) mayor será su tendencia a sufrir la corrosión más insidiosa, la localizada, o sea que sufrirá picaduras (Pitting) o fisuras por corrosión bajo tensión. Lo contrario, o sea cuanto menos Inoxidable sea una aleación (acero al carbono) mayor será su tendencia a sufrir corrosión Uniforme. Esto significa que cuando utilizamos aceros al C, la corrosión tenderá a ser Uniforme y su prevención podrá lograrse con métodos simples como pintura o sobre espesor, en este último caso con los costos correspondientes al material adicional. Por el contrario al usar Aceros Inoxidables, estos fallarán por corrosión Localizada, picaduras o fisuras que pueden no ser detectadas fácilmente e inutilizarán el componente (tanques o cañerías) manteniendo la mayor parte del material sano. La corrosión Localizada no se puede prevenir con el agregado en el proyecto de sobreespesores, solo se puede prevenir con “Conocimiento” el conocimiento del comportamiento de cada aleación en cada medio específico, el Conocimiento del fabricante obtenido empíricamente por cientos de ensayos, el Conocimiento de Ingeniería del Usuario. O sea elegimos gastar en Tecnología (calidad) en vez de gastar en material extra (cantidad). Parece ser que este es el camino que hoy en día a tomado la Ingeniería para resolver, también, los problemas de Corrosión.

S.Laufgang

07/07/03