

# Corrosión Intergranular en Aceros inoxidables

Con alguna frecuencia llegan al IEI consultas acerca de la posibilidad de que se presente este problema en ciertas instalaciones industriales. El siguiente es un estudio sobre dicho fenómeno.

**ING. ALVARO FORERO MORA**  
 Ingeniero Metalúrgico UIS.  
 Master of Science en Metalurgia  
 Física de Lehigh University Bethlehem U.S.A.  
 Actualmente jefe de Metalografía de la Sección de Metalurgia, IEI.

Algunos aleantes se adicionan al acero con el fin de conferir ciertas propiedades como resistencia mecánica, penetración del temple, etc., mientras que otros, tienen el propósito de formar carburos que resistan la abrasión, o aumenten la resistencia a la corrosión u oxidación. Estos elementos pueden estar en solución en la ferrita austenita, o formar carburos como se indica en la Tabla 1; algunos de los aleantes pueden ser encontrados también como inclusiones, ciertos compuestos intermetálicos o inclusive en estado elemental.

A principios del siglo los científicos al tratar de desarrollar un acero con alta resistencia a la corrosión, encontraron que el elemento ideal para este fin es el cromo. Investigaciones posteriores condujeron al uso de este elemento en cantidades hasta del 30%. Los efectos adicionales del cromo en los aceros tales como, endurecimiento de la ferrita, formación de carburos, etc. son beneficiosos.

## Aceros inoxidables

La propiedad más importante con- ▶

**TABLA 1**  
**TENDENCIAS GENERALES DE LOS ELEMENTOS ALEANTES EN EL ACERO**  
 (Grossman)

| Elemento | Disuelto en Ferrita | Combinado en carburos |
|----------|---------------------|-----------------------|
| Ni       | Ni                  |                       |
| Si       | Si                  |                       |
| Al       | Al                  |                       |
| Mn       | Mn                  | ←————→ Mn             |
| Cr       | Cr                  | ←————→ Cr             |
| W        | W                   | ←————→ W              |
| Mo       | Mo                  | ←————→ Mo             |
| V        | V                   | ←————→ V              |
| Ti       | Ti                  | ←————→ Ti             |
| Cb       | Cb                  | ←————→ Cb             |

La propiedad más importante conferida por el cromo a los aceros, es la resistencia a la corrosión. *La figura 1 muestra las pérdidas en peso del acero en función del contenido de cromo.* Este comportamiento condujo al desarrollo de los aceros inoxidable, los cuales además del cromo contienen otros elementos como níquel y carbono. Se toma el 12% como el mínimo contenido de cromo, para formar aceros inoxidables.

De acuerdo con diferentes composiciones, estructuras y propiedades, los aceros inoxidables se dividen en tres clases: austeníticos, ferríticos y martensíticos. El problema de la corrosión intergranular es fuerte en la primera clase y se han encontrado casos con mecanismo igual para los ferríticos. *En la Tabla II se indica la composición de algunos aceros inoxidables.*

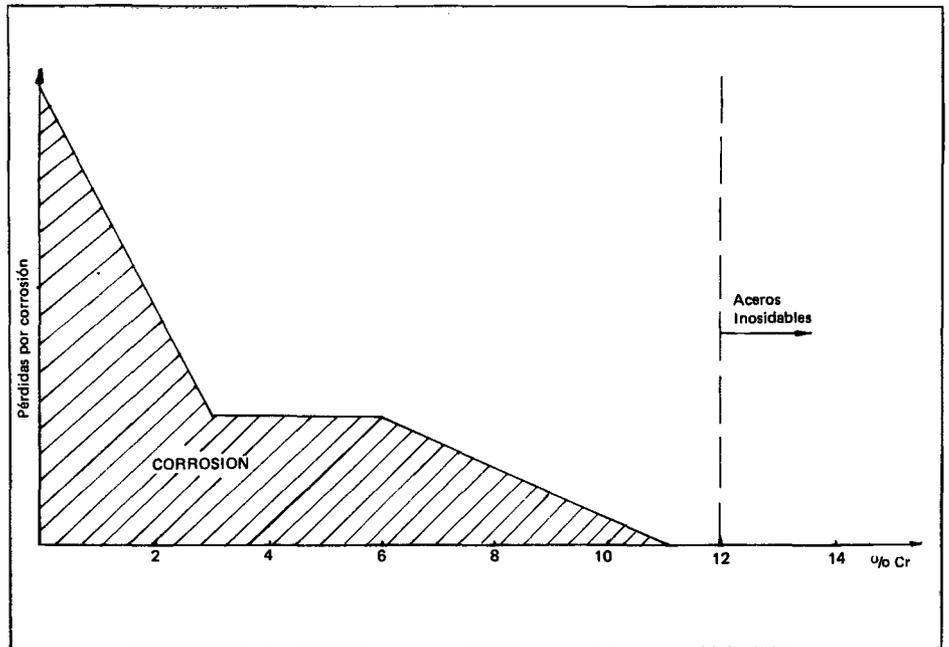


Fig. 1: Comportamiento de los aceros ante medios corrosivos en función del contenido de cromo.

TABLA II – COMPOSICION DE ALGUNOS ACEROS INOXIDABLES

| Tipo A ISI    | C    | Cr | Ni | Si | Mn | P     | S    | Otros            |
|---------------|------|----|----|----|----|-------|------|------------------|
| AUSTENITICOS  |      |    |    |    |    |       |      |                  |
| 202           | 0.15 | 18 | 5  | 1  | 8  | 0.06  | 0.03 | 0.25 N           |
| 302           | 0.15 | 18 | 8  | 1  | 2  | 0.045 | 0.03 |                  |
| 304           | 0.08 | 18 | 8  | 1  | 2  | 0.045 | 0.03 |                  |
| 309           | 0.2  | 23 | 14 | 1  | 2  | 0.045 | 0.03 |                  |
| 316           | 0.08 | 17 | 12 | 1  | 2  | 0.045 | 0.03 | 2-3 Mo           |
| Bajo Carbono  |      |    |    |    |    |       |      |                  |
| 304L          | 0.03 | 18 | 8  | 1  | 2  | 0.045 | 0.03 |                  |
| 316L          | 0.03 | 17 | 12 | 1  | 2  | 0.045 | 0.03 | 2-3 Mo           |
| 317L          | 0.03 | 19 | 13 | 1  | 2  | 0.045 | 0.03 | 3-4 Mo           |
| Estabilizados |      |    |    |    |    |       |      |                  |
| 321           | 0.08 | 18 | 10 | 1  | 2  | 0.045 | 0.03 | 5 x % Tp         |
| 347           | 0.08 | 18 | 12 | 1  | 2  | 0.045 | 0.03 | 10 x % Cb        |
| 348           | 0.08 | 18 | 12 | 1  | 2  | 0.045 | 0.03 | 10 x % C Cb + Ta |
| FERRITICOS    |      |    |    |    |    |       |      |                  |
| 405           | 0.08 | 13 |    | 1  | 1  | 0.04  | 0.03 | 0.2 Al           |
| 430           | 0.12 | 17 |    | 1  | 1  | 0.04  | 0.03 |                  |
| 409           | 0.08 | 11 |    | 1  | 1  | 0.04  | 0.04 | 6 x % C Ti       |
| 436           | 0.12 | 17 |    | 1  | 1  | 0.04  | 0.03 | 5 x % C Nb       |

## Pasividad

La resistencia de los aceros inoxidable a la corrosión resulta de la presencia de una finísima capa de óxido o hidrato en la superficie del metal, que es formada y estabilizada por el cromo y que protege el metal de posterior ataque. Esta película es considerada insoluble, impermeable y autosellante; si se rompe por un rayón, por ejemplo, la película se formará nuevamente al exponerse a un medio oxidante.

Los investigadores afirman que la pasivación no es un estado constante, y que existe solamente en ciertas condiciones. En algunos casos, las condiciones con las cuales se produce la pasividad pueden ser amplias, pero en otros son críticas y pequeños cambios pueden destruirla. Bajo circunstancias favorables para la pasividad, los aceros inoxidable presentan un potencial de solución cercano al de la plata, mientras que cuando la pasividad es destruida, dicho potencial es igual al del hierro.

## Sensibilización

Bain y otros(1) en 1933 fueron los primeros que ofrecieron una explicación para la corrosión intergranular en estos materiales: cuando aceros austeníticos comunes son sometidos a ciertas temperaturas y tiempos, se producirá una precipitación de carburos de cromo en los límites de grano, empobreciendo en cromo sus alrededores, y dejándolos por lo tanto susceptibles a la corrosión. Se determinarán a continuación las condiciones de temperatura, tiempo y composición, bajo las cuales ocurre la sensibilización.

### 1- Temperatura

Quando los aceros austeníticos se calientan a temperaturas entre 650 y 800°C se precipita el  $Cr_{23}C_6$  dejando el área vecina con contenidos de cromo con porcentajes del orden del 2 ó 3 por ciento (figs. 2 y 3). Se debe recordar que se han definido aceros inoxidable como conteniendo un mínimo de 12% de cromo. A temperaturas más bajas de las indicadas, la energía no es suficiente pa-

hacia los límites de grano, mientras que a temperaturas mayores, la difusión es tan alta que homogeniza y tampoco se produce la precipitación.

muy corto tiempo. A cierta distancia de las soldaduras la precipitación ocurre en fracciones de minuto, cuando el acero es expuesto a la temperatura crítica.

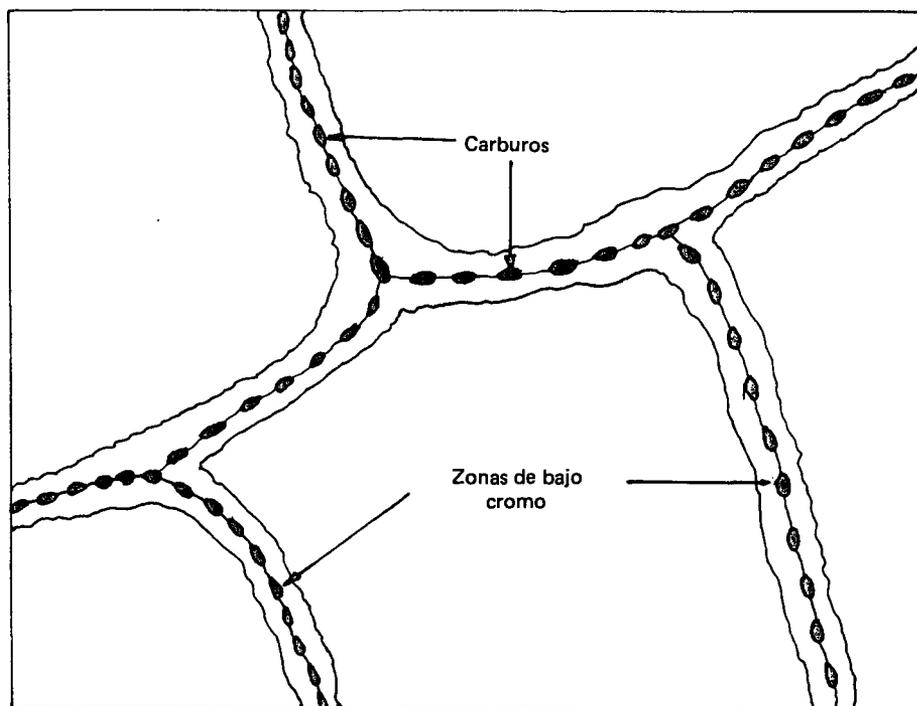


Fig. 2: Esquema de la precipitación intergranular

ra producir la difusión del cromo. Lo anterior es válido para los aceros ferríticos pero su rango de temperaturas es de 800°C a 1.000°C.

### 2- Tiempo

Este es otro factor importante ya que el cromo tiene más tendencia a permanecer en solución que a formar carburos (tabla 1) y además el mecanismo incluye difusión. Se dijo antes que la precipitación ocurre en un amplio rango de temperaturas, pero éste se angosta al calentar y enfriar rápidamente y es muy acelerado a 680°C. El resultado es que la sensibilización puede ocurrir en

### 3- Composición

En aceros austeníticos es necesario tener 16% de cromo y 0.1% de carbono mínimo para que ocurra la sensibilización. Los aceros más utilizados de este grupo, tienen su composición por encima de dichos valores y por lo tanto son suscep-

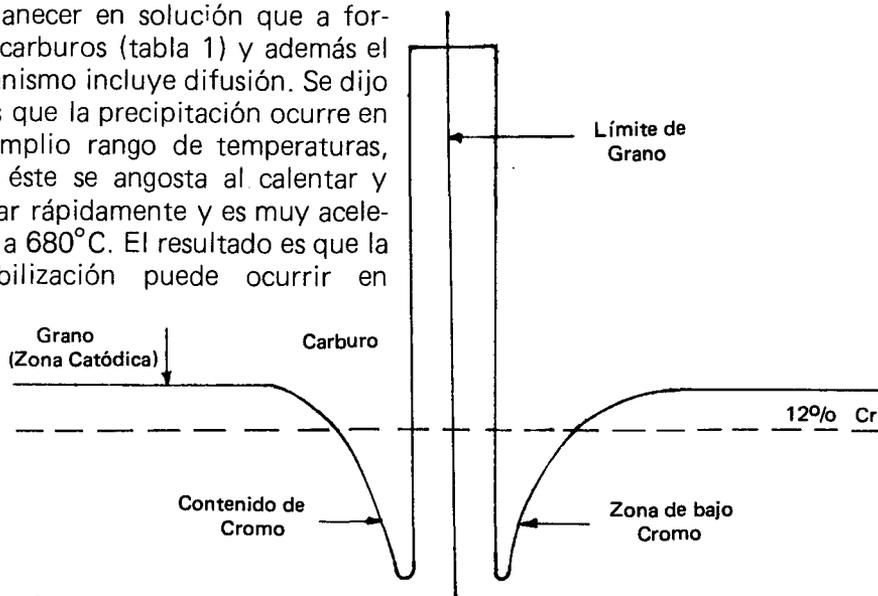
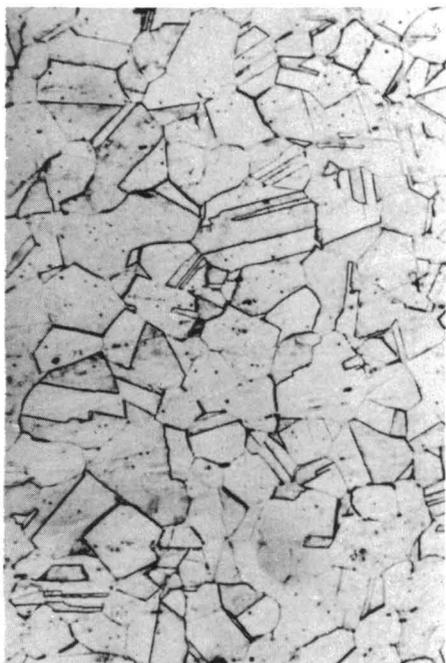


Fig. 3: Variación del contenido de cromo a través de un límite de grano.

tibles a este problema. Debido a este efecto se desarrollaron nuevas clases de aceros, los "estabilizados" y los de "bajo carbono". Los efectos de estos cambios se explicarán más adelante.

Los aceros austeníticos tienen como segundo aleante, el níquel, el cual va del 4 al 22%. Este elemento aumenta la sensibilidad a la precipitación intergranular y a medida que aumenta, el carbono debe disminuirse para tratar de anular su efecto.

Los carburos precipitados dependen de la distribución local de los elementos: con bajo cromo se forma  $Cr_7C_3$  mientras que con altas concentraciones, se forman carburos de alto cromo como son  $Cr_3C$  y  $Cr_{23}C_6$ .



Acero inoxidable austenítico normal - 100 x.  
Laboratorio de metalografía I.E.I.

### Causas

Las principales causas de la precipitación son el tratamiento térmico y la soldadura ya que estos procesos llevan al material o a parte de él a las temperaturas críticas.

Un tratamiento térmico incorrecto en aceros inoxidables austeníticos puede ser perjudicial; normalmente los aceros en cuestión son recocidos después de haber sido deformados en frío para conferir máxima resistencia a la corrosión y restaurar mí-

nima dureza y alta ductilidad. La temperatura para este tratamiento se debe seleccionar muy cuidadosamente, normalmente entre 900 y 1050°C y luego enfriar rápidamente para que al paso por las temperaturas críticas no tenga el tiempo para precipitar. Los aceros estabilizados no necesitan el enfriamiento rápido y los de bajo carbono pueden ser recocidos a cualquier temperatura.

La soldadura de los aceros inoxidables austeníticos normales, lleva una zona cercana del material, inevitablemente a las temperaturas críticas para la precipitación. La posibilidad de que se produzca la sensibilización de estas áreas depende de la temperatura que se alcanza, que como se dijo es inevitable, y del tiempo que el metal está expuesto a estas temperaturas el cual a su vez es función del proceso de soldadura y del espesor de las partes soldadas. Cuando las soldaduras con estos problemas son expuestas a medios corrosivos se presentan dos comportamientos muy conocidos y se llaman decaimiento de la soldadura —weld decay y ataque en el corte de navaja Knife line attack— por el aspecto que presentan.

### El ataque intergranular

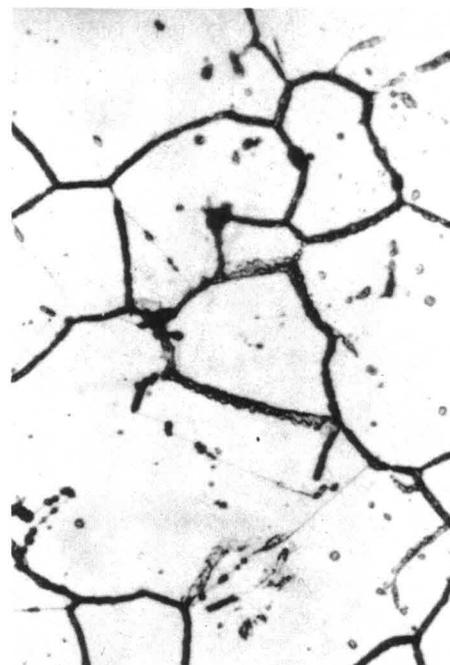
Para condiciones fuertemente oxidantes, el comportamiento de los aceros inoxidables es superior a cualquier otro metal o aleación. El hecho de que dichos aceros sufran la corrosión intergranular cuando están "sensibilizados" no significa que dichas áreas sean específicamente débiles, ya que estos materiales generalmente son usados bajo fuertes condiciones corrosivas. A pesar de que adiciones de 1 a 12% de cromo al acero, aumentan progresivamente la resistencia a la oxidación, ésta es insuficiente para un servicio químico exitoso mientras el contenido de cromo no alcance el 12%.

Las áreas cercanas a los límites de grano que son pobres en cromo, pierden su capacidad para la pasivación y se vuelven anódicas con respecto al resto del grano. Estas áreas

anódicas resultan pequeñas con relación al área catódica, y por lo tanto la densidad de corriente en las áreas anódicas es alta lo cual significa corrosión intensiva. Adicional a lo anterior se debe considerar que la disposición especial de estas áreas hacen la reacción en extremo energética ya que el oxígeno presente sirve como depolarizante al reaccionar con el hidrógeno.

### Como evitar la corrosión intergranular

Existen tres bien conocidas maneras de evitar la corrosión intergranular: estabilizando, bajando el carbono y tratanto térmicamente.



Acero inoxidable austenítico "sensibilizado".  
400 x. Ataque electrolítico. Laboratorio de  
Metalografía I.E.I.

### 1— Estabilización

Este método es el más común y consiste en fomentar la formación de carburos diferentes al cromo, mediante la adición de aleantes ávidos de carbono, como son el titanio y el columbio según la tabla I.

Cuando el acero se calienta a temperaturas de sensibilización, el carbono se combina muy rápidamente con los elementos "estabilizadores", haciendo que el cromo abandone su tendencia a formar carburos. Los grados 321, 347 y 348 (tabla II) son los estabilizados y se usan don-

◁de es necesario soldar las piezas y no es posible tratar térmicamente. Los electrodos para soldar también deben ser de composición "estabilizada" ya que en soldadura de varios cordones, sería llevada a temperaturas críticas.

## 2— Bajo carbono

El contenido de carbono normal en estos aceros es de 0,09% hacia arriba pero con técnicas modernas, como fusión al vacío, es posible bajar más dicho porcentaje. Están disponibles tipos de aceros con 0,03% de carbono máximo que son 304L, 316L y 317L (tabla III).

La presencia del carbono domina todo el problema como se explicó

en el mecanismo del fenómeno, y ciertamente con porcentajes tan bajos como 0.03 la posibilidad de la precipitación de carburos es nula.

En caso de necesitarse soldar estos aceros, se deben utilizar electrodos de la misma composición.

## 3— Tratamiento térmico

Específicamente se trata de "solución de carburos". Es posible destruir la precipitación mediante el tratamiento de toda la pieza. El proceso de "desensibilización" en aceros austeníticos consiste en calentar la pieza a temperaturas entre 1000°C y 1100°C y enfriar rápidamente.

Este proceso devuelve el cromo a la solución en la austenita y no da tiempo para la precipitación ya que el temple final hace que el paso por las temperaturas críticas sea rápido.

Este tratamiento produciría precipitación en aceros ferríticos; la temperatura correcta para estos aceros es por encima de 1100°C y como en el caso anterior, el enfriamiento debe ser rápido.

El problema principal de este método consiste en que es necesario tratar toda la pieza; de otra manera algunas zonas serán inevitablemente expuestas al calentamiento dañino dentro de las temperaturas críticas de nuevo. ◆

---

## BIBLIOGRAFIA

- Bain A.C. Aborn and Rutherford. "Nature and prevention of intergranular corrosion in austenitic stainless steels". American Society for Steel treatment Transactions 21 pp 481-509. (1933).
- Huseby R.A. "Stress relieving of stainless steels and the associated metallurgy". Welding Journal. pp. 304-305. July 1958.
- Lancaster J.F. "The Metallurgy of welding Brazing and soldering". American Elsevier Publishing Co. 1965.
- Fontana M.C. and Beck F.H. "Nature and Mechanism of Passivity of 18-8 stainless steel". Metal Progress 51 pp 939-944. 1947.
- Hodges R.J. "Intergranular Corrosion of High Purity Ferritic stainless Steels". Corrosión Vol. 27. March and April 1971.
- Metals Handbook, Vol. II — Eight Edition. "Heat treating of stainless Steels" pp 243-253. 1964.