

# **¿SON INOXIDABLES LOS ACEROS INOXIDABLES?**

**Miguel Ángel Zago**

**Centro de Capacitación Profesional, Facultad de Ingeniería, Universidad Austral**

## SINOPSIS

Pronto, los aceros inoxidable cumplirán un siglo desde su patentado y su advenimiento industrial masivo. Desde principios del siglo XX fueron suministrando importantísimas soluciones a un sin fin de problemas relacionados con las diversas solicitaciones corrosivas. Las más de 500 variedades existentes no resultan limitativas para su expansión por las nuevas aplicaciones o por los nuevos desarrollos. No obstante, en la actualidad, existe cierto desconocimiento respecto a sus atributos y, como consecuencia, una reducción notable en el aprovechamiento de sus innumerables virtudes.

Son sin dudas los procesos de oxidación, de deterioro galvánico, de deterioro disolutivo y de desgaste los fenómenos corrosivos que causan mayores pérdidas económicas dentro de aquellos que afectan a la materia. Cuando se seleccionan materiales resistentes a estos fenómenos se hace a partir de recomendaciones, normas, tablas y ábacos que si bien son útiles, poco profundizan en el conocimiento y difusión de los fenómenos corrosivos. Los aceros inoxidable no escapan a estas situaciones. Su designación es, probablemente, la que induce a creer erróneamente que si son “inoxidable” pueden resistir a “cualquier proceso corrosivo”.

La presente recopilación de experiencias aplicadas tiene por objeto reconocer los procesos de degradación que afectan a los aceros inoxidable de manera que se puedan aprovechar mejor y prolongar su vida útil, reduciendo los riesgos de falla y aprovechando mejor los recursos económicos siempre tan escasos.

## PALABRAS CLAVES

Palabras claves: corrosión, oxidación, acero, gamágeno, austenítico, alfégeno, ferrítico, austenoferrítico.

## INTRODUCCIÓN

La corrosión es el deterioro que sufren los materiales en general y los metales en particular al reaccionar con el medio que los rodea. La resistencia que los metales oponen a la corrosión puede atribuirse a tres causas principales: la composición química, la estructura metalográfica y la capa de óxido muy adherente y compacta que se forma sobre la superficie e impide la corrosión ulterior. Este último atributo se denomina pasivación ó pasivado. Los aceros inoxidable se caracterizan por reunir estos tres atributos, en algunos casos en forma parcial y en otros de manera casi total. La presencia de cromo en estos aceros es determinante para evaluar su resistencia a la corrosión; la Figura 1 muestra su influencia en la resistencia a la corrosión atmosférica.

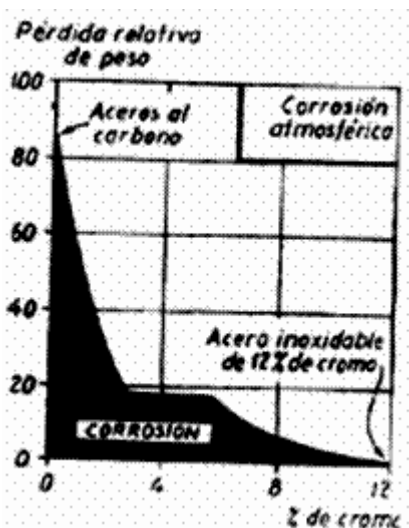


FIGURA 1: influencia del contenido de cromo en la resistencia de los aceros a la acción de una atmósfera industrial.

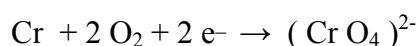
El proceso corrosivo es generalmente complejo ya que simultáneamente actúan varios mecanismos y es por ello que no hay un acero inoxidable que satisfaga totalmente a esas solicitaciones.

Se estudian a continuación los diversos procesos corrosivos que afectan a los aceros inoxidables.

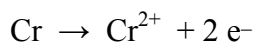
## DESARROLLO

### PASIVADO DE LOS ACEROS INOXIDABLES

En una celda de concentración de oxígeno, éste acentúa la corrosión pero lo hace donde su presencia es baja. En la ausencia de diferenciales de concentración de oxígeno se notarán otros efectos. Específicamente, el oxígeno podrá reaccionar con iones y electrones del ánodo para formar una superficie protectora. Esta reacción es particularmente significativa en los aceros inoxidables donde se produce la siguiente reacción:



Los iones  $(\text{CrO}_4)^{2-}$  son absorbidos en la superficie anódica y de hecho la aíslan de posteriores reacciones anódicas, pasivándose así el metal base (Figura 2). Un acero con más de 13% de cromo es completamente resistente a la corrosión bajo una condición de oxidación; sin embargo, en ausencia de oxígeno, la reacción



está libre para proseguir. De allí que estos aceros son pasivos en la presencia de oxígeno o de ácidos oxidantes tales como  $\text{HNO}_3$  ó  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y son activos en presencia de  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$  u otros ácidos libres de oxígeno o reductores. Un acero inoxidable es, por lo tanto, colocado dentro de una serie galvánica en una posición u otra (Tabla 1) dependiendo del nivel de oxidación del electrolito.

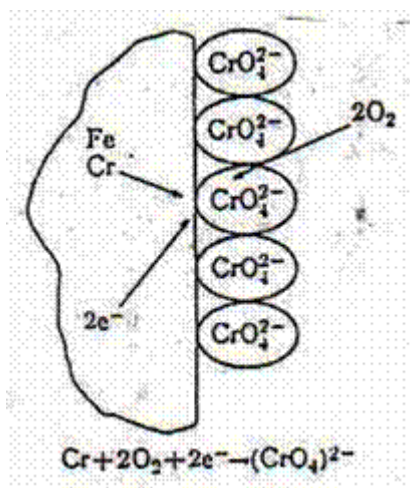


FIGURA 2

Además del pasivado de los aceros inoxidables existen muchos metales y aleaciones con idéntica posibilidad; un caso típico de pasivación se halla en el cobre que es corroído más fácilmente por el ácido nítrico diluido en agua que en ácido nítrico concentrado. En cada caso el cobre recibe mayor protección en las soluciones más oxidantes debido a que se forma sobre el ánodo una superficie pasiva de iones  $\text{NO}_3^-$ .

## CORROSIÓN GALVÁNICA

El mecanismo de corrosión más importante y frecuente es el galvánico o electroquímico. Se origina a causa de la diferencia de potencial que se establece entre dos metales distintos que se encuentran en contacto mutuo, sumergidos en un medio corrosivo que funciona como electrolito. Los metales sumergidos constituyen los electrodos de la celda donde el de mayor resistencia a la corrosión es el cátodo y el más corrosible el ánodo. El ánodo desprenderá iones que pasarán a la solución y será corroído. El cátodo, en cambio, se protegerá. Si se ordenan los elementos según la tendencia que sus átomos tienen de disolverse en forma de iones en el medio líquido que los rodea, se obtiene una serie de potenciales normales. En ella los elementos se encuentran en orden decreciente de actividad. En la parte superior se encuentran los más activos, es decir, los que tienen mayor tendencia a disolverse y en la parte inferior los más pasivos. Entre dos metales en contacto entre sí, el que se encuentra en un sitio más alto de la serie se constituirá en ánodo y el que se encuentra en un sitio más bajo, en cátodo. En la práctica se utilizan series galvánicas de origen empírico como la de la Tabla 1 donde el electrolito considerado es el agua de mar y los metales expuestos no son solo los puros sino las aleaciones más habituales que con ellos se elaboran. En algunos casos se presentan estados activos y pasivos de un mismo metal, tales como los aceros inoxidable que están protegidos por una capa de óxido de cromo que le da carácter pasivo. Pero si esa capa de óxido desaparece por un ataque ácido reductor o por erosión, cambia su situación y se hace activo frente a la corrosión galvánica.

El fenómeno de corrosión galvánica puede darse en dos zonas de la superficie de un mismo metal. Esas zonas pueden tener diferencias de composición o de estructura metalográfica. También puede tratarse de la misma superficie metálica de composición y estructura metalográfica homogénea, sumergida en dos líquidos diferentes o en un líquido cuya concentración iónica o contenido de oxígeno molecular disuelto es diferente en los dos puntos. En este caso el mecanismo de corrosión se denomina de concentración iónica. Cuando se trata de un líquido corrosivo en movimiento con dos velocidades distintas, un extremo del material se encontrará con mayor cantidad de iones corrosivos por unidad de tiempo que el otro extremo y se formará una celda de concentración iónica. Ocurre lo mismo con un disco metálico que gira dentro de un líquido corrosivo: la superficie anular exterior se mueve a mayor velocidad tangencial que la del centro, estableciéndose una celda de concentración iónica donde la periferia se corroe por resultar anódica respecto al resto. La corrosión en rendijas es una forma particular de corrosión galvánica por concentración iónica que daña las superficies metálicas en contacto con roscas, empaquetaduras y drenajes mal diseñados. Durante los periodos de parada de las plantas de procesos deben drenarse los circuitos hidráulicos y desmontarse empaquetaduras y roscas pues los restos de los líquidos corrosivos estancados provocan la corrosión en rendijas. En general se recomienda utilizar juntas de teflón o de otros plásticos no absorbentes en lugar de materiales fibrosos y unir por soldadura en lugar de roscar.

La corriente eléctrica que se establece durante la corrosión galvánica rige la cantidad en peso de metal corroído, cualquiera sea la superficie anódica. Así, entonces, si el ánodo es extenso, perderá poco espesor, pero si en cambio posee una superficie reducida, la cantidad desprendida de metal durante la corrosión puede perforar la pieza e inutilizarla en poco tiempo. Por ello resulta importante diseñar los equipos con superficies mayores en la zona anódica que en la catódica. A este fenómeno se lo denomina efecto de área. Una causa de daños muy importante en la corrosión por oxidación atmosférica lo provoca el efecto de área. Cuando el óxido que se forma en la reacción entre el metal y el oxígeno es adherente, protege al metal y lo pasiva como en los aceros inoxidable; en cambio, cuando es menos adherente o más poroso, lo protege parcialmente. La parte protegida se hace catódica y los poros anódicos y de pequeña superficie por lo que la corrosión avanza en profundidad, perforando rápidamente los espesores delgados. El efecto de área es el proceso secundario mediante el cual prospera la corrosión localizada por picado en los aceros inoxidable.

|                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------|
| <b>EXTREMO CORROÍDO ANÓDICO Ó MENOS NOBLE</b>                         |
| Magnesio y sus aleaciones                                             |
| Zinc                                                                  |
| Aluminio y sus aleaciones 5052; 3004; 3003; 1100; 6063; en este orden |
| Cadmio                                                                |
| Aleaciones de aluminio: 2117; 2017; 2024; en este orden               |
| Aceros al carbono y de media aleación en este orden                   |
| Fundición gris                                                        |
| Acero con 4 a 6% de cromo                                             |
| Acero inoxidable martensítico IRAM 51420 activo                       |
| Acero inoxidable ferrítico IRAM 51410 activo                          |
| Acero inoxidable ferrítico IRAM 51430 activo                          |
| Acero inoxidable IRAM 30304 activo                                    |
| Acero inoxidable IRAM 30316 activo                                    |
| Acero inoxidable IRAM 30310 activo                                    |
| Soldadura estaño-plomo 50/50                                          |
| Plomo                                                                 |
| Estaño                                                                |
| Latón Muntz 60/40                                                     |
| Bronce al manganeso                                                   |
| Níquel activo                                                         |
| Inconel 600 activo                                                    |
| Hastelloy B                                                           |
| Latón almirantazgo 70/29/1                                            |
| Bronce al aluminio                                                    |
| Bronce rojo (85% Cu) (85/5/5/5)                                       |
| Cobre                                                                 |
| Bronce al silicio                                                     |
| Aleaciones cobre-níquel (70/30)                                       |
| Bronces al plomo fundidos                                             |
| Níquel pasivo                                                         |
| Inconel 600 pasivo                                                    |
| Monel                                                                 |
| Acero inoxidable martensítico IRAM 51420 pasivo                       |
| Acero inoxidable ferrítico IRAM 51410 pasivo                          |
| Acero inoxidable ferrítico IRAM 51430 pasivo                          |
| Acero inoxidable IRAM 30304 pasivo                                    |
| Acero inoxidable IRAM 30316 pasivo                                    |
| Acero inoxidable IRAM 30310 pasivo                                    |
| Inconel 625                                                           |
| Hastelloy C                                                           |
| Plata                                                                 |
| Titanio                                                               |
| Oro                                                                   |
| Platino                                                               |
| <b>EXTREMO PROTEGIDO CATÓDICO Ó MÁS NOBLE</b>                         |

TABLA 1: serie galvánica de los metales y aleaciones en agua de mar

## CORROSIÓN INTERGRANULAR O INTERCRISTALINA

Es una forma de corrosión que ataca al borde de los granos y a sus adyacencias sin afectar notablemente al resto del grano. Comienza en la superficie del metal y penetra en profundidad.

La elevada cantidad de elementos de aleación que contienen los aceros inoxidables austeníticos, como el IRAM 30304, provoca la retención de austenita que es metaestable a temperatura ambiente. Como dicho acero no se usa particularmente en aplicaciones donde se requiera dureza, sino en otras del tipo estructural y anticorrosiva, el carbono, que es más soluble en austenita a altas temperaturas que a bajas (Figura 3), se mantiene en valores pequeños con un máximo acotado. Si este acero con 0,08% de carbono se enfría rápidamente desde 980 °C, no se forman carburos segregados y no se constituyen celdas galvánicas; pero, si por el contrario, se lo enfría lentamente o se lo mantiene alrededor de 650 °C por relativamente corto tiempo, el carbono precipita como carburo de cromo en forma de un fino precipitado en el borde de los granos austeníticos (Figura 4). Los precipitados son de pequeño tamaño y en algunas ocasiones no se pueden observar con el microscopio óptico. En esta situación son posibles dos efectos: la formación de celdas galvánicas en escala microscópica por precipitación de cementita o la formación de carburo de cromo más estable que la cementita que vacía de cromo el área de los bordes de grano y elimina su acción pasivadora local. La precipitación de carburo de cromo consume, aproximadamente, 12 partes de cromo por cada una de carbono y como los átomos de cromo más grandes se difunden más lentamente, el contenido de éste en las áreas adyacentes desciende por debajo de los niveles necesarios de 12% para brindar protección anticorrosiva (Figura 5).

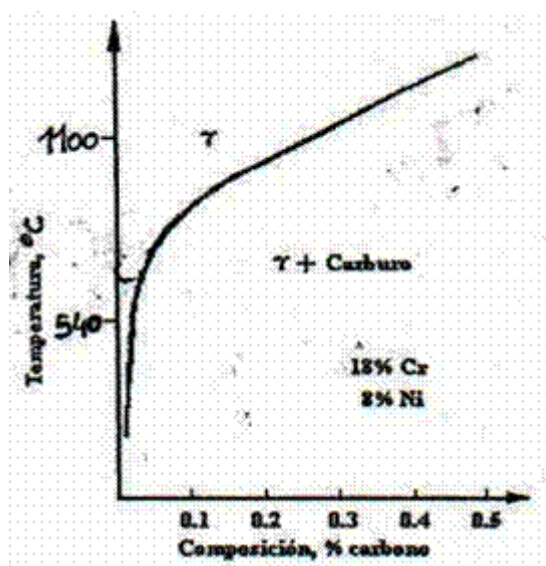


FIGURA 3

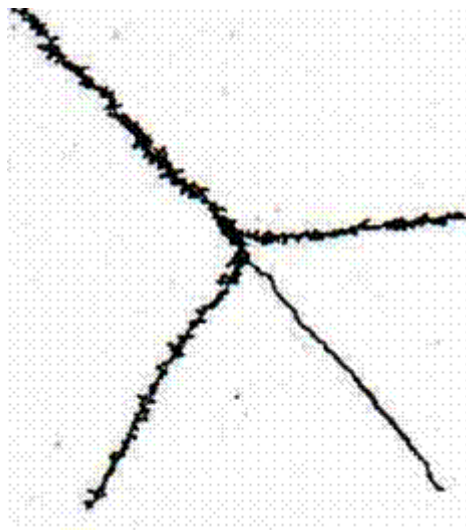


FIGURA 4

El carburo de cromo simple que se forma habitualmente es del tipo  $M_{23}C_6$  y responde a la relación estequiométrica  $Cr_{23}C_6$ . La designación genérica  $M_{23}C_6$  es una de las tres con que se identifican los carburos ya que no siempre adoptan la forma simple del carburo de cromo; en ella la M representa la cantidad de componentes que conforman el carburo. Existen otros dos tipos genéricos:  $M_6C$  (por ejemplo el  $W_6C$ : carburo de tungsteno) y el  $MC$  (por ejemplo el  $VC$ : carburo de vanadio). También suelen precipitar carburos combinados como  $(CrFe)_4C$ ;  $(CrFe)_7C_3$  y  $(CrFe)_3C$  y nitruros como  $Cr_2N$  que provocan un efecto equivalente a los carburos.

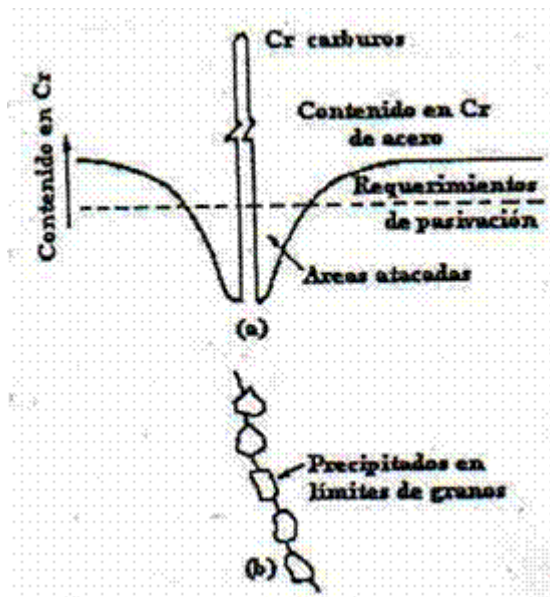


FIGURA 5

Cualquiera de los efectos citados acentúa la corrosión en el borde de grano. Este tipo de corrosión intergranular se torna severo si el acero es calentado dentro del rango de temperaturas de la precipitación de carburos (Figura 6). Hay varias formas de inhibir la corrosión intergranular, dependiendo la selección de las condiciones de servicio:

- Enfriar bruscamente (tratamiento vulgarmente denominado “hipertemple”) desde temperaturas superiores a 1050°C para evitar la precipitación de carburos. Este método se usa comúnmente en aceros inoxidable austeníticos, y también en ferríticos donde se produce el mismo fenómeno, excepto que las condiciones de servicio requieran temperaturas comprendidas en el rango de precipitación o cuando las operaciones de conformación, de unión por soldadura o el tamaño impida tal práctica de enfriamiento brusco.
- Suministrar un recocido extremadamente largo en el periodo de redisolución del carburo. Esta técnica ofrece alguna ventaja debido a la aglomeración de los carburos y la homogeneización del contenido en cromo, de modo que no hay deficiencia en los bordes de grano. Sin embargo, el procedimiento es menos común porque la mejoría en la resistencia a la corrosión es relativamente pequeña.
- Seleccionar un acero con menos de 0,03% de carbono que eliminaría la precipitación de carburos. Estos aceros inoxidable llevan la letra “L” (de “Low carbon”) o las letras “EL” (de “Extra Low carbon”) acompañando a la designación normalizada, por ejemplo: IRAM 30304 L ó IRAM 30316 EL (AISI 304 L ó AISI 316 EL, respectivamente). Aun en estas condiciones estos aceros pueden presentar problemas de corrosión intergranular cuando se los somete a temperaturas elevadas pero por precipitación de fase  $\sigma$  (fase sigma) microscópica o submicroscópica. La fase  $\sigma$  es un producto originario del diagrama de equilibrio hierro – cromo (Figura 7) que aparece en diversas circunstancias.
- Utilizar aceros inoxidable modernos con extra bajo contenido de intersticiales (EBI) que poseen menos de 100 ppm de nitrógeno y menos de 200 ppm de carbono. Estos aceros se producen por fusión bajo vacío y su precio es sensiblemente superior a sus equivalentes “L” y “EL”.
- Seleccionar un acero con mayor cantidad de cromo y níquel.
- Seleccionar un acero que contenga elementos aleantes que fácilmente formen carburos. Elementos tales como el titanio (acero inoxidable austenítico IRAM 30321 equivalente al AISI 321), el columbio ó niobio (acero inoxidable austenítico IRAM 30347 equivalente al AISI 347), y el tantalio precipitan formando carburos a temperaturas elevadas. Los carburos así formados son inocuos pues ni expulsan el cromo del acero, ni localizan la acción galvánica en el borde de



los granos. Esta técnica es muy utilizada, particularmente en construcciones soldadas y se denominan aceros inoxidables desensibilizados.

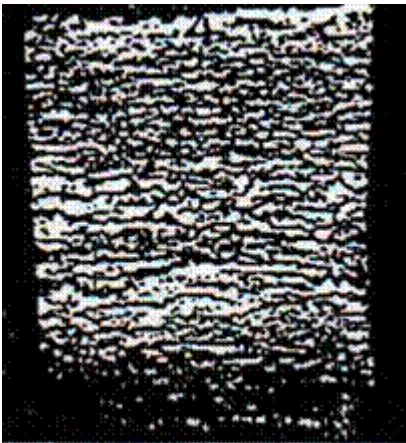


FIGURA 6

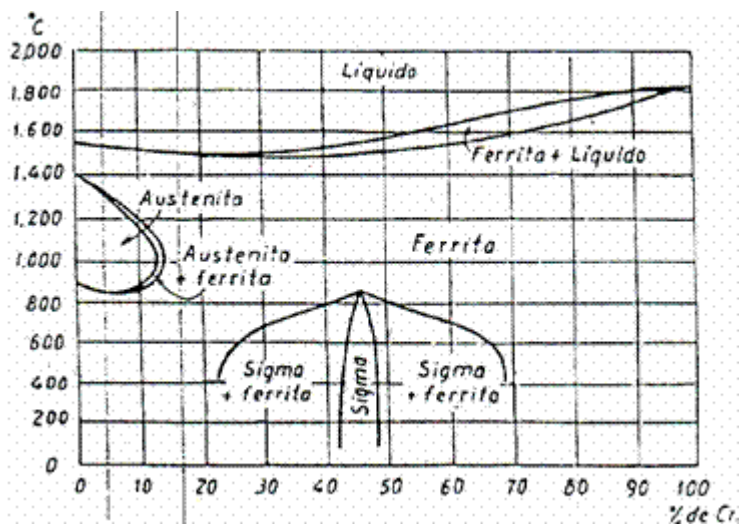


FIGURA 7: diagrama binario de equilibrio térmico hierro – cromo.

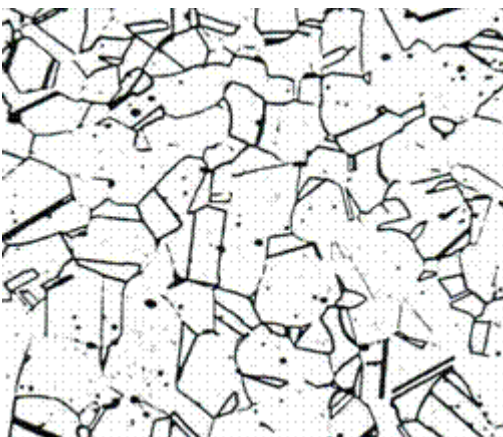


FIGURA 8: acero inoxidable austenítico IRAM 30304 (AISI 304) sin defectos en los bordes de granos.



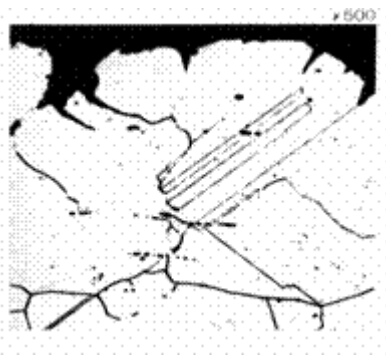


FIGURA 9: acero inoxidable austenítico sensibilizado con corrosión intergranular

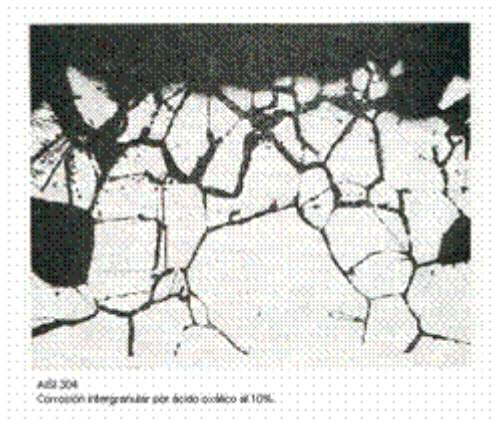


FIGURA 10: casos de corrosión intergranular. La foto de la derecha corresponde a un barril de cerveza de acero IRAM 30304 que colapsó durante la limpieza.

Los aceros inoxidables austenoferríticos o duplex resisten mejor la corrosión intergranular que los austeníticos ya que el empobrecimiento en el contenido de cromo en la interfase granular austenita – austenita es muy superior que en la austenita – ferrita. Esto sucede pues el cromo, elemento preponderantemente alfégeno, difunde a una velocidad 1000 veces superior en la ferrita que en la austenita.

## CORROSIÓN BAJO TENSIÓN

La corrosión bajo tensión (“stress corrosion”) es uno de los procesos corrosivos más perjudiciales ya que en un lapso de tiempo extremadamente corto puede producir la falla de un componente o material. Consiste en la propagación de una o varias grietas cuando actúan, simultáneamente, un esfuerzo de tracción o un esfuerzo con componente tractora sobre un material en un medio agresivo. La propagación de las fisuras es del tipo transgranular, pudiendo ser intergranular cuando hay propensión a la corrosión ínter cristalina (intergranular) y su orientación es perpendicular al esfuerzo (Figura 11).

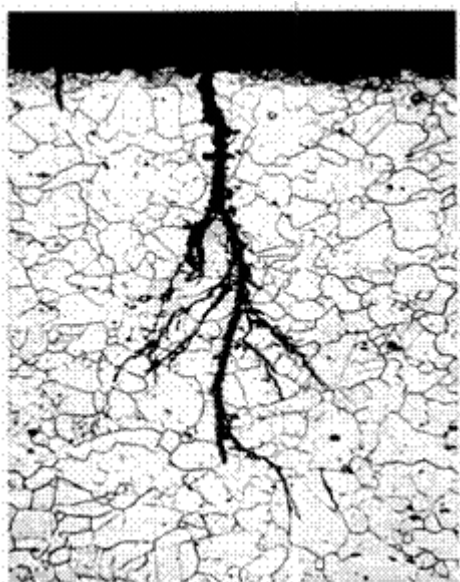


FIGURA 11: grietas transgranulares provocadas por corrosión bajo tensión en un acero inoxidable austenítico IRAM 30304 (AISI 304).

Las condiciones para que se produzca la corrosión bajo tensión en aceros inoxidables son:

- la existencia de una sollicitación de tracción externa o también por tensiones residuales provocadas por soldadura o por conformado en frío;
- la presencia de un medio agresor específico como soluciones que contienen cloruros metálicos concentrados mencionados en la Tabla 2.

| SAL                 | CONCENTRACIÓN EN PESO (%) | TEMPERATURA (°C) |
|---------------------|---------------------------|------------------|
| Cloruro de amonio   | 30                        | Ebullición       |
| Cloruro de calcio   | 37                        | Ebullición       |
| Cloruro de cobalto  | Saturado                  | 100              |
| Cloruro de litio    | 30                        | Ebullición       |
| Cloruro de magnesio | 40 (pH 4)                 | 104              |
| Cloruro de magnesio | 60 (pH 4,4)               | 116              |
| Cloruro de magnesio | 42                        | 154              |
| Cloruro de mercurio | 10                        | Ebullición       |
| Cloruro de sodio    | Saturado                  | 100              |
| Cloruro de zinc     | 54                        | Ebullición       |

TABLA 2

Además de estas soluciones se ha comprobado que la rotura de este tipo puede producirse en otros medios como cloruro de etilo con agua a temperaturas superiores a la ambiente, en agua de mar y en otros medios que no contienen cantidades apreciables de cloruros como soluciones acuosas de soda cáustica y de ácido sulfhídrico  $H_2S$ , productos formados en las refinerías a partir del ácido sulfhídrico, agua a temperatura elevada y vapor de agua.

Los aceros inoxidables austeníticos son propensos a la corrosión bajo tensión en soluciones que contienen iones cloruros o en soluciones fuertemente alcalinas; en cambio, los aceros inoxidables ferríticos no lo son en el mismo medio y los aceros inoxidables austenoferríticos o duplex toleran muy bien esa condición. Cuando la corrosión bajo tensión es inducida por presencia de iones cloro  $Cl^-$ , la ferrita de los aceros duplex resulta anódica frente a la austenita y tiende a

corroerse protegiendo a la otra fase. Pero como la ferrita tiene mayor límite elástico, soporta mejor la componente mecánica de tracción. No obstante conviene destacar que la comprensión del fenómeno de corrosión bajo tensión aun no tiene una explicación común y es muy probable que no la tenga ya que fenómenos iguales proceden de situaciones distintas y se deben estudiar específicamente. En la Figura 12 se muestra el comportamiento de varios aceros frente a este fenómeno.

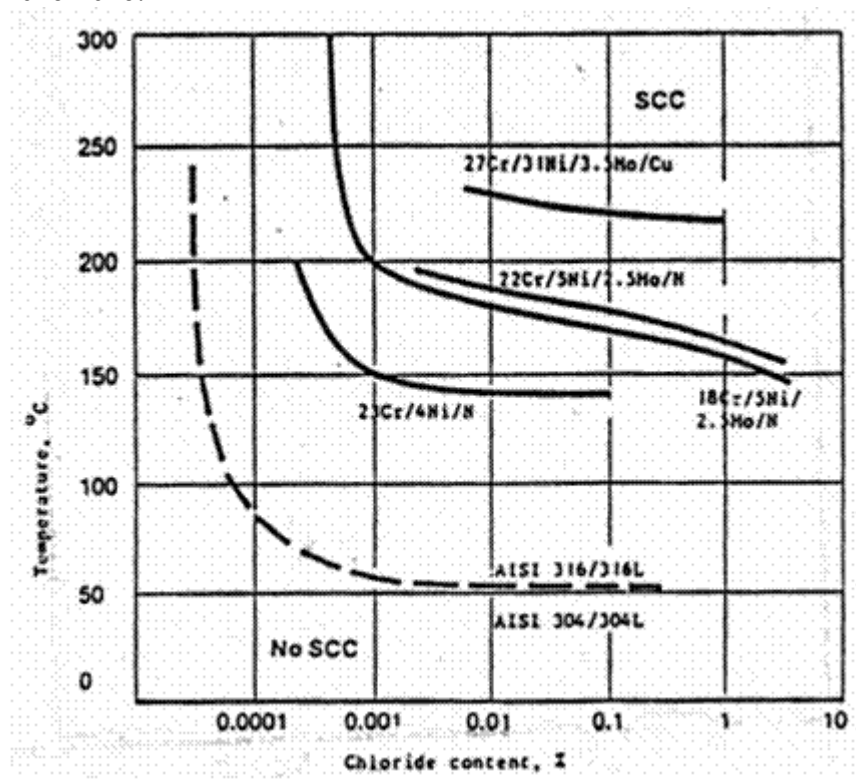


FIGURA 12: comportamiento frente a la corrosión bajo tensión de varios aceros inoxidables en presencia de cantidades variables de cloro a distintas temperaturas. En línea de trazos se representan aceros austeníticos y en líneas continuas, aceros duplex.

El primer caso de corrosión bajo tensión históricamente registrado data del año 1865 y se produjo en aceros de bajo carbono en contacto con soluciones alcalinas. El problema se presentó bajo la forma de grietas inter granulares que condujeron a la rotura catastrófica de una caldera de vapor. Las fisuras se vincularon con las tensiones residuales producidas por el roblonado de fijación de los tubos colectores y la elevada alcalinidad del agua.

En 1937 se documentó el primer caso de corrosión bajo tensión en aceros inoxidables austeníticos. La falla producida en un recipiente para la industria cafetera se diagnosticó como “*una fisuración transgranular que se presenta en medios acuosos que contienen iones cloruro*”. A partir de allí se produjeron numerosos casos similares en estos aceros, no solo a temperaturas elevadas sino también a temperaturas cercanas a la ambiente en presencia de algunas partes por millón de cloruros.

Hacia 1969 se observó que los aceros inoxidables martensíticos templados con bajo revenido eran marcadamente susceptibles a la corrosión bajo tensión en ambiente marino. Un revenido más elevado disminuye notablemente dicho efecto pero sacrifica la resistencia mecánica y la dureza.

**Influencia de las tensiones mecánicas sobre la corrosión bajo tensión:** las tensiones que influyen son siempre las de tracción. Así, por ejemplo, si un acero inoxidable es plegado sin relevarse las tensiones residuales de deformación plástica, el proceso de corrosión bajo tensión se inicia en la superficie traccionada con la aparición y propagación posterior de grietas. Existen varios ensayos para determinar el comportamiento de diversos metales a este tipo de corrosión:

- a) Ensayo con deformación impuesta: consiste en plegar una probeta normalizada con cierto radio, en forma de “U”, y someterla al medio corrosivo.
- b) Ensayo bajo carga de tracción constante: se aplica una carga de tracción sobre la probeta normalizada, inmersa en un medio corrosivo específico para cada aleación (cloruro de magnesio  $\text{Cl}_2\text{Mg}$  en ebullición para aceros inoxidable, amoníaco  $\text{NH}_3$  para latones, líquidos con iones cloro  $\text{Cl}^-$  para aleaciones de aluminio). Existe una relación entre la tensión de fractura  $\sigma_f$  y el tiempo de fractura  $t_f$  según la siguiente expresión:

$$\sigma_f = f(\log t_f)$$

- c) Ensayo fractomecánico para determinar la Tenacidad a la Fractura: consiste en someter una probeta normalizada con una entalla, y prefisurada por fatiga, a una tensión que permita determinar el valor de la Tenacidad a la Fractura  $K_{IC}$  correspondiente a un medio corrosivo (Figura 13).

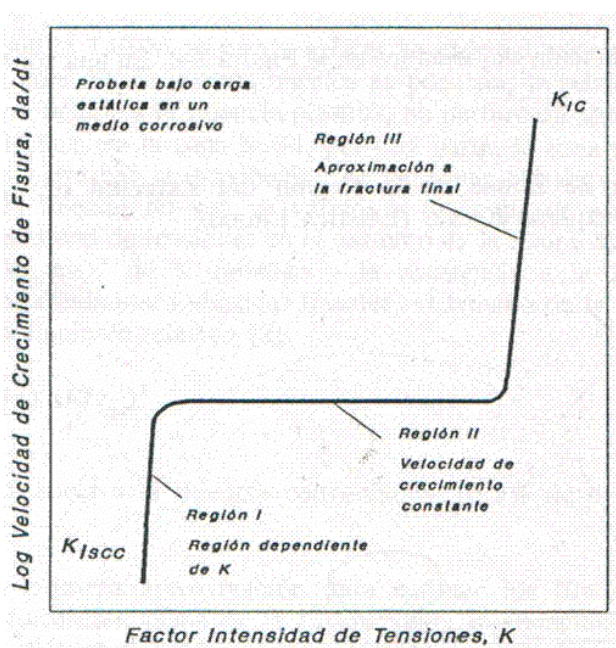


FIGURA 13: velocidad de crecimiento de una grieta por corrosión bajo tensión  $da/dt$  en función de la variación del factor de intensidad de tensiones  $\Delta K$  en un medio agresivo según la Mecánica de Fractura Elástica Lineal (LEFM, Linear Elastic Fracture Mechanics)

**Influencia del medio sobre la corrosión bajo tensión:** no existe especificidad de los medios que provocan corrosión bajo tensión; así, por ejemplo, un medio acuoso conteniendo menos de 2 ppm de iones cloruro puede ser bien tolerando por un acero inoxidable austenítico. Pero el agregado de 2 ppm de oxígeno disuelto en ese medio activa el proceso corrosivo sobre el mismo acero.

El aumento de la corriente galvánica desarrollada durante un proceso electrolítico de corrosión aumenta la velocidad de propagación de la grieta y disminuye el tiempo de fractura  $t_f$ . También la diferencia de potencial influye de la misma manera.

Algunos aniones, como los de los elementos halógenos, son los responsables de la ruptura localizada de la pasividad de los aceros inoxidable y provocan el foco inicial de corrosión (picado, Figura 14). Otros, en cambio, son responsables de retardar la repasivación como los aniones  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HO}^-$  y  $\text{CO}_3^{=}$ .

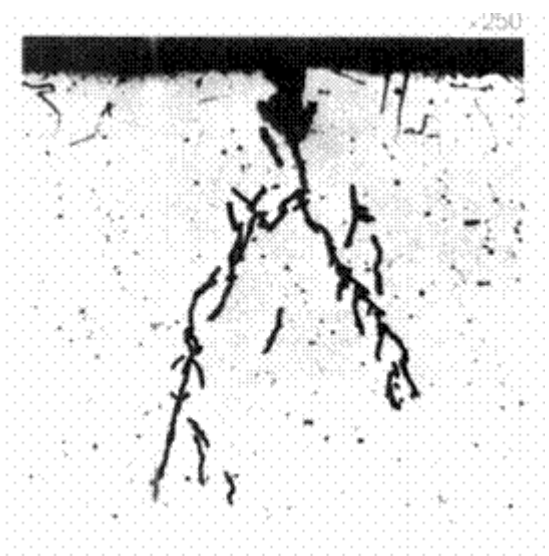


FIGURA 14: grietas transgranulares provocadas por corrosión bajo tensión en un acero inoxidable austenítico IRAM 30304 (AISI 304). El proceso se inicia por corrosión por picado..

Indirectamente, el ión hidrógeno (catión  $H^+$ ) tiene un papel destacado en la corrosión bajo tensión: cuando se puede reducir a hidrógeno atómico o naciente ( $H^\uparrow$ ), difunde fácilmente en muchos metales y fragiliza su estructura metalográfica o se moleculariza y ejerce presiones intergranulares. Ambas situaciones preparan el camino para la propagación de grietas. El fenómeno es conocido como fragilidad por hidrógeno y se produce especialmente en aceros de alta resistencia templados como los aceros inoxidables martensíticos. El hidrógeno es generado por la mayoría de los procesos de corrosión, reaccionando con agentes oxidantes o evolucionando como gas. Ciertos catalizadores (iones sulfuro) y la elevación de la temperatura, promueven la entrada del hidrógeno al metal; una vez allí, éste causa una pérdida de ductilidad. Aun cuando el metal no se corroe lo suficientemente rápido para provocar el problema, la fisuración puede ocurrir si éste es acoplado a otro material menos noble que se corroe libremente. El hidrógeno producido se deposita sobre el miembro catódico de la cupla. Así, por ejemplo, el contacto con aluminio causa una rápida corrosión bajo tensión en un acero inoxidable martensítico con 13% de cromo.

La temperatura es también un factor influyente sobre la corrosión bajo tensión. Si bien la presencia de iones  $Cl^-$  en el medio corrosivo predispone a los aceros inoxidables a sufrir este deterioro, el incremento de la temperatura agrava aun más la situación.

**Influencia de las propiedades metalúrgicas sobre la corrosión bajo tensión:** la presencia de impurezas afecta la resistencia a este fenómeno. También el agregado de elementos de aleación que desembocan en la formación de segundas fases en los materiales metálicos, los predispone a sufrir este tipo de corrosión.

La estructura cristalina aporta su responsabilidad. El acero inoxidable austenítico posee una distribución atómica c.ca.c. (cúbica de caras centradas) y no tolera la presencia de cloruro de magnesio  $Cl_2Mg$  en ebullición; pero un tratamiento de conformación plástica en frío lo puede transformar en c.cu.c. (cúbica de cuerpo centrado) y su resistencia, medida como tiempo de fractura  $t_f$ , se multiplica en más de 100 veces.

El aumento del tamaño de grano favorece la susceptibilidad a la corrosión bajo tensión. También los tratamientos térmicos de envejecimiento en aceros inoxidables precipitables del tipo 17-4PH manifiestan tendencias marcadas a la corrosión bajo tensión por la presencia de preprecipitados de segunda fase. En estos casos la susceptibilidad aumenta, particularmente en presencia de iones  $Cl^-$ .

El contenido de níquel de los aceros inoxidables influye notablemente en la resistencia a la corrosión bajo tensión. En la Figura 15 se muestra el tiempo de falla en que se produce la fractura transgranular en función del porcentaje de níquel, observándose que es crítico el rango de 7 a 12%.

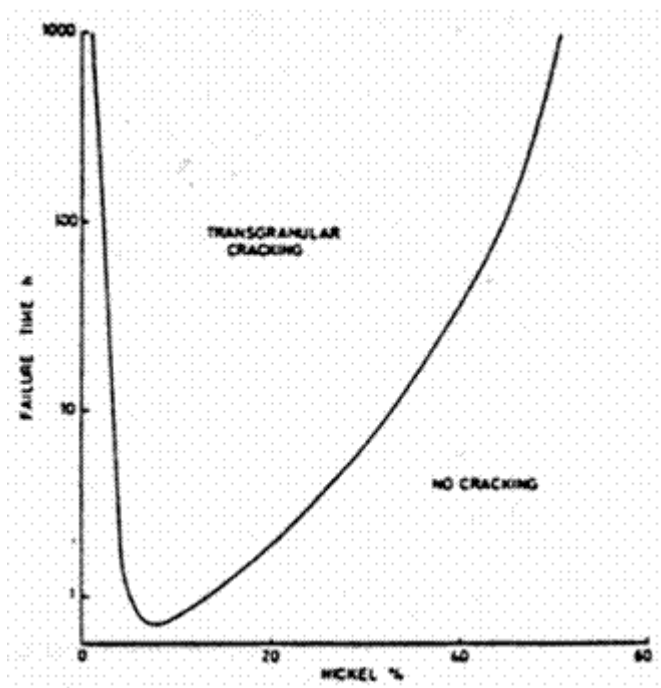


FIGURA 15

También, como se verá a continuación, las dislocaciones y sus formas de presentarse tienen decisiva importancia en el fenómeno de corrosión bajo tensión en los aceros inoxidables austeníticos.

**Teoría de corrosión bajo tensión por rotura de la capa de óxidos pasivantes debido a la propagación de dislocaciones:** la aplicación de solicitaciones provoca la propagación de las dislocaciones que, al aflorar a la superficie, generan un escalón y rompen la película pasivante de ciertas aleaciones como los aceros inoxidables austeníticos (fenómeno de formación de intrusiones y extrusiones). Si el escalón es muy pequeño o el óxido es muy plástico, no se observará efecto alguno en la velocidad de corrosión. Si, por el contrario, el escalón es alto y el óxido es frágil, se producirá la rotura de la capa pasivante y en este caso podrán ocurrir varios procesos:

- si la repasivación es muy rápida, habrá un rápido paso transitorio de corriente;
- si la repasivación es muy lenta o nula, se localizará un picado sobre el escalón siguiendo el mecanismo propuesto para este caso;
- si la repasivación ocurre a una velocidad moderada, el metal en el escalón presentará un cierto grado de corrosión.

Antes de alcanzar una repasivación total, la llegada de nuevas dislocaciones permitirá que el ataque continúe en forma muy localizada, generando fisuras por corrosión bajo tensión (Figura 16).



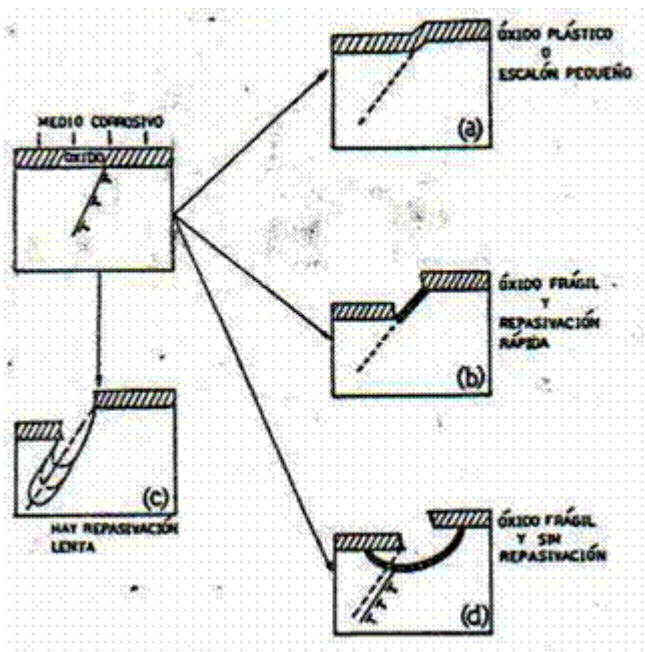
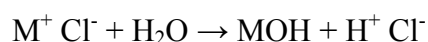


FIGURA 16

## CORROSIÓN LOCALIZADA POR PICADO Y EN RENDIJAS

El picado es una de las formas más peligrosas de la corrosión. Se presenta como un ataque intenso y concentrado en pequeñas áreas del orden de  $1 \text{ mm}^2$ , mientras que las superficies aledañas no se alteran. Cuando los aceros inoxidable son expuestos a ambientes con presencia de iones de elementos halógenos, particularmente de cloro ( $\text{Cl}^-$ ), el más habitual en el ambiente, se produce el picado. Una reacción típica es la que provoca la presencia de iones cloro  $\text{Cl}^-$  en el agua. Estos iones se combinan con el metal formando cloruro metálico. Al reaccionar con el agua producen hidróxido metálico y liberan ácido clorhídrico aumentando la acidez localizada y profundizando el proceso corrosivo. En la siguiente reacción se resume el fenómeno:



El proceso corrosivo penetra a gran profundidad, llegando a perforar espesores superiores al centímetro. Se debe a la diferencia de composición de algunas fases dentro de las aleaciones. Dichas fases tienen diferentes potenciales galvánicos y se crea una pequeña celda donde el ánodo es un área muy reducida frente al resto de la pieza (efecto de área). La densidad de corriente en el área pequeña es muy elevada y produce la corrosión en profundidad.

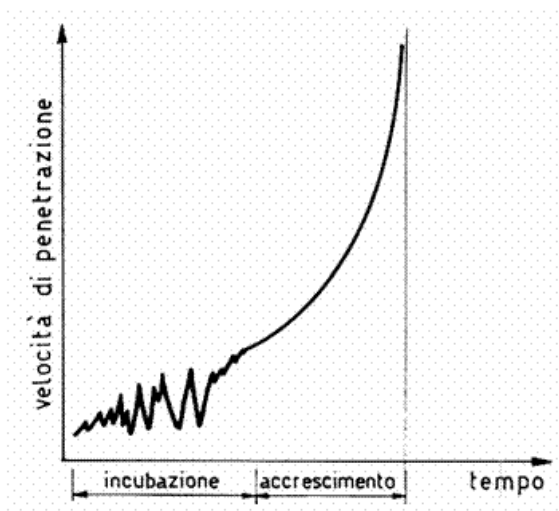


FIGURA 17: proceso de corrosión localizada por picado.

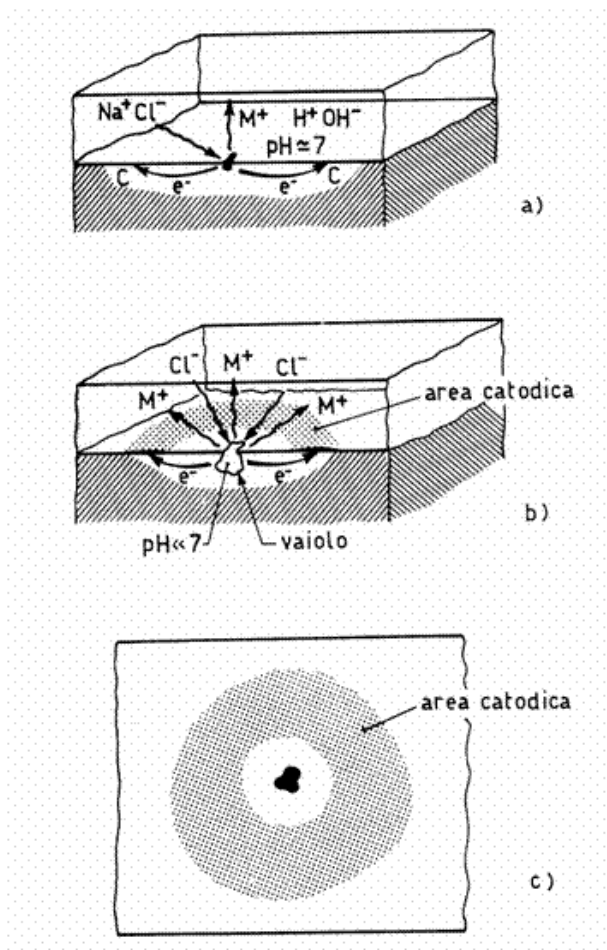


FIGURA 18: esquema de la formación de un orificio de picado en un acero inoxidable en un medio bajo cloruro de sodio: a) fase de incubación donde se señala con la letra "C" la localización del área catódica; b) fase de crecimiento; c) fase final con la vista en planta del orificio caracterizada por la formación del alo catódico.

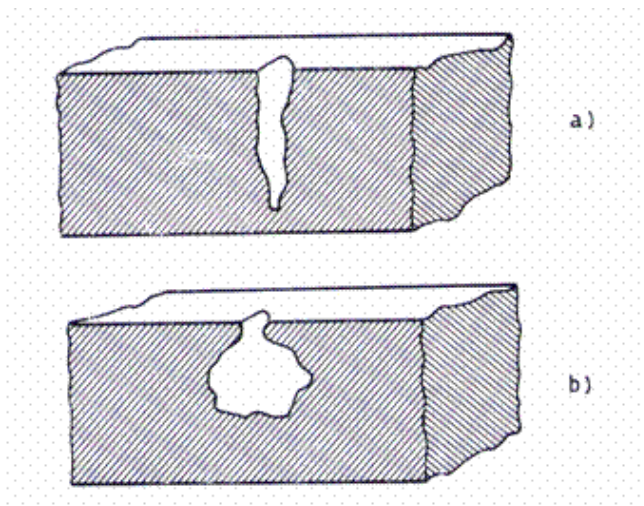


FIGURA 19: tipos de picaduras que se presentan en los aceros inoxidable: a) tipo penetrante; b) tipo cavernosa.

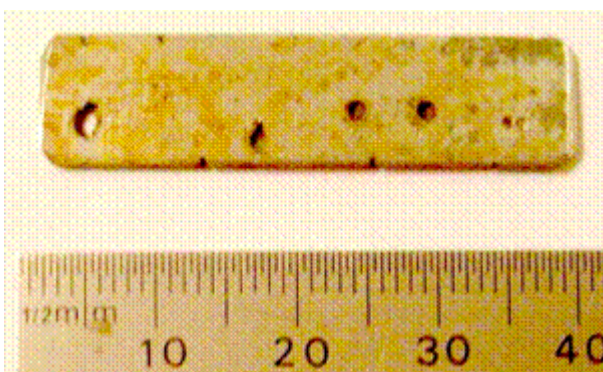
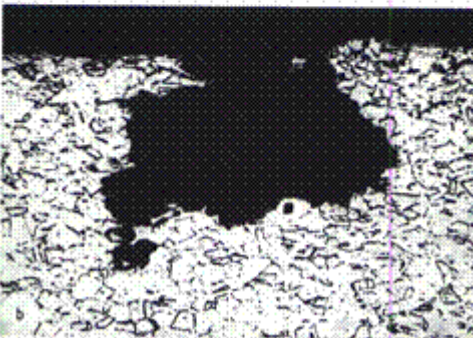
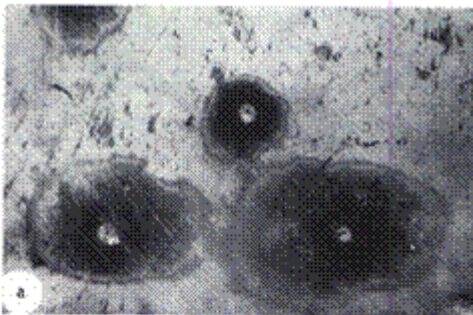


FIGURA 20: Superior y Media: vista en planta y en corte de un acero inoxidable corroído por picado; en la superior se aprecia la forma de picado penetrante y en la media un típico picado cavernoso. Abajo: soporte de filtro para circuito de agua potable de acero inoxidable austenítico con orificios pasantes provocados por corrosión por picado.

La corrosión en rendijas (“crevice corrosion”) ó en intersticios se produce en lugares donde se aloja y retiene un electrolito o donde la aireación es diferencial (oxigenación diferencial) como grietas, ranuras, roscas, juntas y bridas.

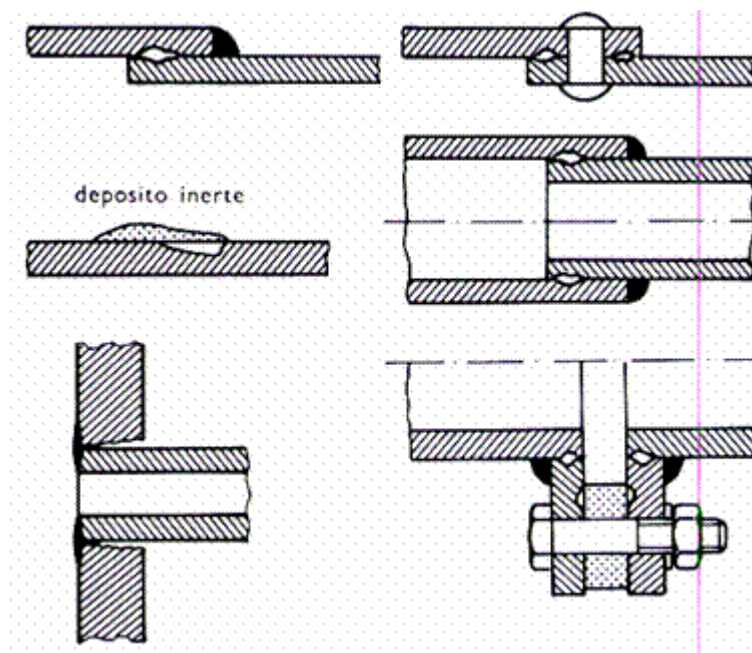


FIGURA 21: esquemas de instalaciones defectuosas sujetas a corrosión en rendijas.

El electrolito retenido cambia su composición y su pH, resultando en un medio agresivo que ataca la pátina pasivante de los aceros inoxidable. En la figura 22 se muestran esquemas que evitan situaciones de corrosión en rendijas.

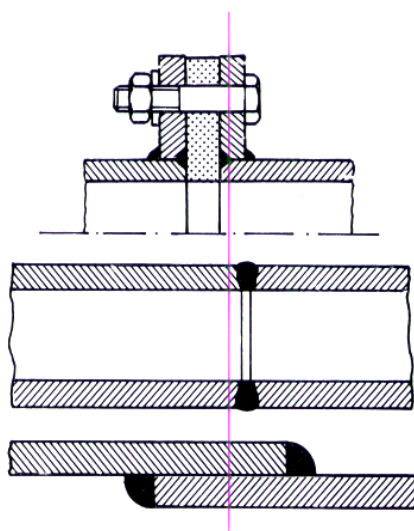


FIGURA 22: esquemas de instalaciones adecuadas para evitar la corrosión en rendijas.

La corrosión localizada por picado y en rendijas puede controlarse mediante una composición química adecuada. Existen varias expresiones para determinar la resistencia al picado. El Índice de Resistencia al Picado IRP surge de la sumatoria del porcentaje de cromo y de ciertas cantidades equivalentes de otros elementos de aleación:

$$\text{IRP} = \% \text{Cr} + 3,3 \times \% \text{Mo}$$

El IRP es conocido con la sigla inglesa PRE (Pitting Resistance Equivalent = resistencia equivalente al picado) ó PREN (Pitting Resistance Equivalent Number). Cuando el IRP supera el valor de 30%, el acero inoxidable es suficientemente resistente al picado en los medios corrosivos genéricos.

La incorporación de ciertas cantidades de nitrógeno en solución sólida en los aceros inoxidables austeníticos y, particularmente, en los austenoferríticos ó duplex, proporciona una resistencia adicional a esta forma de corrosión y aumenta notablemente el IRP agregándosele a la sigla la letra N ( $IRP_N$ ):

$$IRP_N = \% Cr + 3,3 \times \% Mo + 16 \times \% N$$

Los aceros inoxidables austenoferríticos poseen muy buena resistencia a la corrosión localizada por picado y en rendijas, no solo por la presencia de nitrógeno sino, además, por contener ciertas cantidades de otros elementos de aleación como cobre, tungsteno y molibdeno. Estos aleantes le confieren una resistencia adicional al ataque de la pátina pasivante por iones  $Cl^-$  y por ácido sulfhídrico. La estructura de estos aceros está formada por granos ferríticos y austeníticos; en los primeros se diluye preferentemente el cromo por ser alfégeno mientras que el nitrógeno, por ser gamágeno, se disuelve en los granos austeníticos. De esta manera ambos tipos de granos poseen aproximadamente la misma resistencia a la corrosión por picado. La Figura 23 muestra la respuesta de diversos aceros inoxidables a la acción del picado.

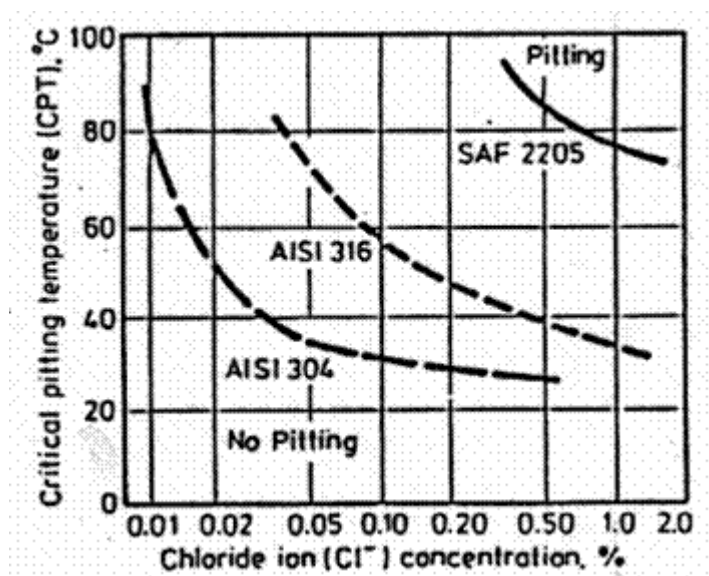


FIGURA 23: comportamiento frente a la corrosión por picado de varios aceros inoxidables en presencia de cantidades variables de cloro a distintas temperaturas. En línea de trazos se representan aceros austeníticos y en línea continua un aceros duplex.

En el  $IRP_N$  de los aceros inoxidables ferríticos, el porcentaje de cromo no debe considerarse en su totalidad como parte de este factor. Parte del cromo se combina con elementos intersticiales como carbono y nitrógeno bajo la forma de carburos y nitruros, respectivamente, que no aumentan la resistencia al picado.

También el agregado de tungsteno potencia ostensiblemente la resistencia al picado. Con estas adiciones el indicador se denomina  $IRP_{NW}$ :

$$IRP_{NW} = \% Cr + 3,3 \times \% Mo + 16 \times \% N + 30 \times \% W$$



## CORROSIÓN A ALTA TEMPERATURA

La fina y transparente película de óxido de cromo que se forma inmediatamente en la superficie de los aceros inoxidable, determina, en cierta medida, su resistencia a la oxidación a altas temperaturas. La adherencia de esta película es lo que le confiere resistencia al escamado. La máxima temperatura a la cual puede ser utilizado bajo determinadas condiciones, es lo que se denomina temperatura de escamado.

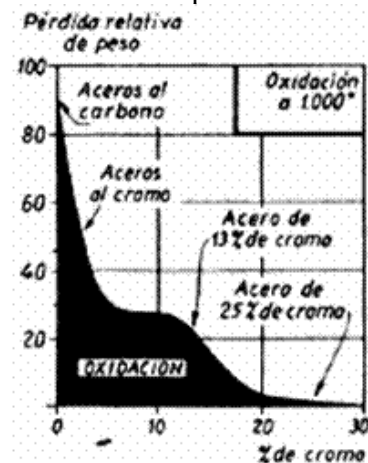


FIGURA 24: influencia del contenido de cromo en la resistencia a la oxidación a elevada temperatura de los aceros.

El desprendimiento de la capa de óxido de cromo comienza a los 700°C en los aceros más atacables y a 1100°C en los más resistentes. Estas temperaturas cambian en función de que las condiciones de servicio sean intermitentes o continuas. Para los aceros inoxidable ferríticos y martensíticos, la temperatura máxima disminuye entre 50 y 100°C cuando el servicio es continuo. En los aceros inoxidable austeníticos sucede lo contrario pues su alto coeficiente de dilatación provoca que la pátina protectora se rompa en los ciclos de calentamiento y enfriamiento (Tabla 3). Los aceros inoxidable austeníticos expuestos a atmósferas con compuestos de azufre son fuertemente afectados; en esas condiciones se forman sulfuros de níquel que se desprenden con la pátina y la cascarilla que se forma sobre ellos dejando expuesto el material base (acero no pasivado o activo). En estos casos conviene remplazar el austenítico por uno ferrítico de alto cromo. No obstante se debe tener en cuenta que el mantenimiento de los aceros inoxidable ferríticos por largos períodos a temperaturas cercanas a los 475°C reduce drásticamente la tenacidad. El fenómeno es conocido como “fragilidad de los 475 °C” y es causado por la precipitación de partículas submicroscópicas ricas en cromo y coherentes con la matriz. La nueva fase se denomina  $\alpha'$  y presenta una estructura cúbica de cuerpo centrado cuyo parámetro de red es levemente mayor que el de la matriz. La cinética de precipitación de  $\alpha'$  responde a un modelo de nucleación y crecimiento en estado sólido. La fragilización se produce pues las dislocaciones quedan ancladas por los precipitados de fase  $\alpha'$ . Estos fenómenos también se producen en la fase ferrítica de los aceros inoxidable duplex, limitándose su utilización solamente hasta los 300°C. La Figura 25 representa la curva de la “S” para un acero duplex típico; en ella se observa la precipitación de la fase  $\alpha'$  y de otras como la  $\sigma$  y la  $\chi$  que también provocan fragilización.



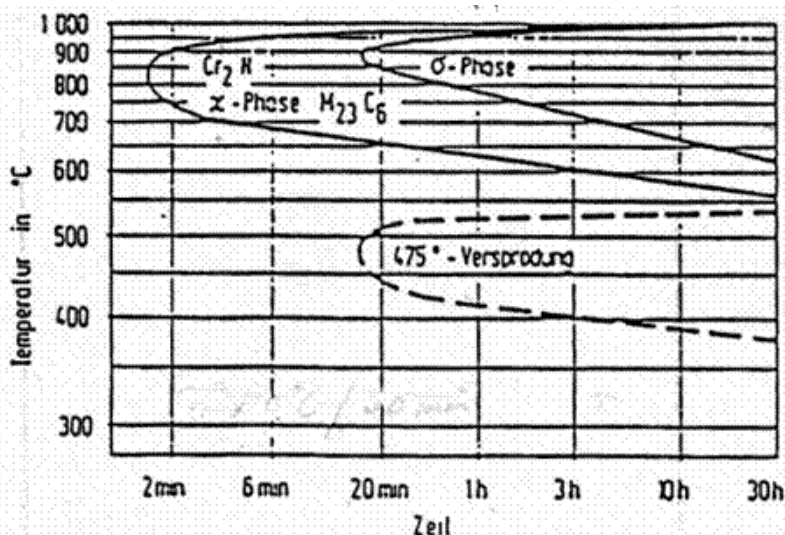


FIGURA 25: curva de la “S” o diagrama TTT (temperatura – tiempo – transformación) para un acero austenoferrítico mostrando la precipitación de fases fragilizantes.

| Designazione<br>AISI | Servizio<br>continuo<br>°C | Servizio<br>intermittente<br>°C |
|----------------------|----------------------------|---------------------------------|
| 201                  | 845                        | 815                             |
| 202                  | 845                        | 815                             |
| 301                  | 900                        | 840                             |
| 302                  | 925                        | 870                             |
| 304                  | 925                        | 870                             |
| 308                  | 980                        | 925                             |
| 309                  | 1095                       | 980                             |
| 310                  | 1150                       | 1035                            |
| 316, 316 Ti, 316 Nb  | 925                        | 870                             |
| 317                  | 925                        | 870                             |
| 321                  | 925                        | 870                             |
| 330                  | 1150                       | 1035                            |
| 347                  | 925                        | 870                             |
| 403, 410             | 705                        | 815                             |
| 405                  | 705                        | 815                             |
| 416                  | 675                        | 760                             |
| 420                  | 620                        | 735                             |
| 430                  | 815                        | 870                             |
| 440                  | 760                        | 815                             |
| 442                  | 980                        | 1035                            |
| 446                  | 1095                       | 1175                            |

TABLA 3: valores indicativos de la temperatura máxima de servicio en aire para algunos aceros inoxidables.

La resistencia a las altas temperaturas no solo se logra con el aumento del contenido de cromo para consolidar la pátina de óxido protectora y con el aumento de níquel para afianzar la austenita. También se suele incorporar aluminio y silicio para formar, junto al óxido de cromo, otros óxidos combinados de esos elementos y compactar aun más la pátina.

## CORROSIÓN EN CORDONES SOLDADOS

La soldadura de los aceros inoxidable generalmente modifica la resistencia a la corrosión del metal base. Se pueden distinguir seis procesos de corrosión debido a la soldadura:

**Corrosión intergranular o intercristalina**

**Corrosión bajo tensión**

**Corrosión galvánica**

**Corrosión por picado (“pitting”)**

**Ataque en línea de cuchillo**

**Corrosión selectiva de la ferrita delta del cordón**

Los cuatro primeros procesos son similares a los ya descritos mientras que los restantes son exclusivos de la operación de soldeo. De los primeros se describen los aspectos vinculados con la soldadura.

**Corrosión intergranular o intercristalina:** el problema de corrosión asociado con los grados austeníticos tipo 18-8, es el inter granular preferentemente durante el servicio en medios agresivos (ácidos sulfúrico, nítrico, clorhídrico, etc.). El ataque se reduce a una banda comprendida entre los 2 y 10 mm del borde del cordón soldado, paralelo al mismo conocida como zona afectada por el calor (ZAC). Se produce por la precipitación de películas muy finas de carburos ricos en cromo en los bordes de grano por calentamiento de la región a temperaturas de entre 500 y 900°C durante un largo tiempo. Es más rápida alrededor de 650°C, preferentemente en los bordes de granos o dentro de la ferrita (si estuviera presente) o a lo largo de planos de clivaje en materiales trabajados en frío.

La región de borde de grano inmediatamente adyacente a los carburos tiene niveles de cromo por debajo de los necesarios para mantener la pasividad y el material se hace susceptible al ataque inter cristalino.

La soldadura debe ser realizada con el menor aporte calórico, sin precalentamiento y la temperatura entre pasadas debe ser lo más baja posible para conseguir la máxima velocidad de enfriamiento luego de cada una de ellas. En oportunidades resulta conveniente un rápido enfriamiento forzado.

Este problema se manifiesta aun más para pequeños espesores debido a que la velocidad de enfriamiento es menor (menor masa) y por lo tanto mayor el tiempo de permanencia en el rango crítico de temperaturas.

**Corrosión bajo tensión:** en los aceros inoxidable austeníticos, las tensiones residuales pueden ser suficientes para producir fisuras. En presencia de solo algunas partes por millón de cloruros pueden aparecer fisuras transgranulares de importante magnitud. Como en general las estructuras de aceros austeníticos soldadas no pueden ser aliviadas de tensiones, ya que entre 500 y 900°C puede producirse corrosión intercristalina o ataque en línea de cuchillo, serían necesarias temperaturas superiores a los 950°C. Consecuentemente, debe prestarse atención a la presencia de cloruros en el medio, en particular a temperaturas superiores a la ambiente.

Para prevenir este tipo de corrosión se puede realizar, después de terminada la soldadura, una operación de arenado o granallado. Se trata de introducir tensiones de compresión en la superficie con lo que se tiende a impedir la formación y propagación de grietas.

Otra alternativa es utilizar aceros austenoferríticos de mayor resistencia a la corrosión bajo tensión que los aceros totalmente austeníticos, aliviando las tensiones con tratamiento térmico entre 900 y 1050 °C. Cuando se usan estos aceros duplex soldados, desaparece parcialmente la estructura austenoferrítica en la ZAC y precipita ferrita Widmanstätten, perdiéndose parte de la resistencia a esta forma de corrosión.

Aunque los aceros inoxidable martensíticos y ferríticos no parecen verse afectados por este problema, los primeros, y en especial los grados de alto carbono como el IRAM 51440 (AISI 440), son susceptibles a una forma de fisuras en medios corrosivos debido al hidrógeno liberado en reacciones de corrosión catódica (fisuración inducida por hidrógeno). Puede evitarse con un

tratamiento térmico inmediatamente posterior a la soldadura calentando hasta 200°C para conseguir la difusión del hidrógeno hacia el exterior del material. Paralelamente se produce un alivio de tensiones y una reducción en la dureza de la junta.

**Corrosión galvánica:** todos los aceros inoxidables son susceptibles a este tipo de corrosión. Se produce entre metales de distinto potencial de oxidación (micro estructuras con distintas fases, heterogeneidades químicas, zonas con aireación diferencial, ambientes con materiales extraños) en presencia de un electrolito que cierra el circuito eléctrico y permite que se establezca el paso de corriente.

Para prevenirla se debe remover el óxido de las soldaduras con medios mecánicos o químicos y, desde el punto de vista operativo, evitar discontinuidades como socavaduras, poros, falta de fusión o cualquier otro defecto que produzca acumulación de oxígeno.

**Corrosión por picado:** se puede presentar en el cordón de soldadura de todos los aceros inoxidables dependiendo del medio en que actúa (halogenado, pH ácido, alta temperatura, fluidos en movimiento, agua de mar). Para prevenirla se adiciona molibdeno al aporte usando electrodos E316 y E317.

**Ataque en línea de cuchillo:** un acero desensibilizado aleado con niobio o titanio, no se encuentra a salvo de la corrosión intergranular cuando es soldado y puede sufrirla en la zona inmediatamente adyacente a la línea de fusión en presencia de, por ejemplo, ácido nítrico (NO<sub>3</sub>H) caliente. Se llama “Ataque en Línea de Cuchillo” por la forma lineal y estrecha a través de la cual se manifiesta y se debe a la precipitación de carburos de cromo. Desconcierta el hecho de que suceda en materiales estabilizados (aleados con niobio o titanio). Surge como consecuencia de una baja velocidad de enfriamiento por lo que se recomienda enfriar bruscamente luego de la soldadura si las condiciones estructurales y de diseño lo permiten. Pero luego del soldeo pueden precipitar carburos de cromo como consecuencia de un recocido de alivio de tensiones.

Esta forma de corrosión es más rápida con contenidos crecientes de carbono y en ausencia de oxígeno. Se pudo comprobar que el Ataque en Línea de Cuchillo no ocurre cuando se trata de aceros inoxidables austeníticos con menos de 0,025 % de carbono y con el agregado de mayor cantidad de estabilizadores. El agregado de 12 a 15 partes de niobio por cada una de carbono en aceros del tipo “L” (“Low carbon”) elimina el problema de ataque en línea de cuchillo.

Los aceros inoxidables ferríticos también suelen presentar susceptibilidad al ataque intergranular preferencial en la ZAC. Sin embargo, en estos materiales, la zona sensible es la inmediatamente adyacente a la soldadura y no una banda a cierta distancia como en los aceros inoxidables austeníticos. Estos aceros tienen la temperatura de sensibilización por encima de los 925°C y la inmunidad a este tipo de corrosión puede ser restaurada por un tratamiento térmico de una hora entre 650 y 850°C. Se nota que los rangos de temperatura son opuestos a los de los aceros austeníticos. Las causas de este ataque no son del todo comprendidas; aparentemente se debe a la precipitación de carburos aunque se observó en aceros con menos de 0,01% de carbono. La Figura 26 muestra la ubicación de la zona corroída por este proceso.

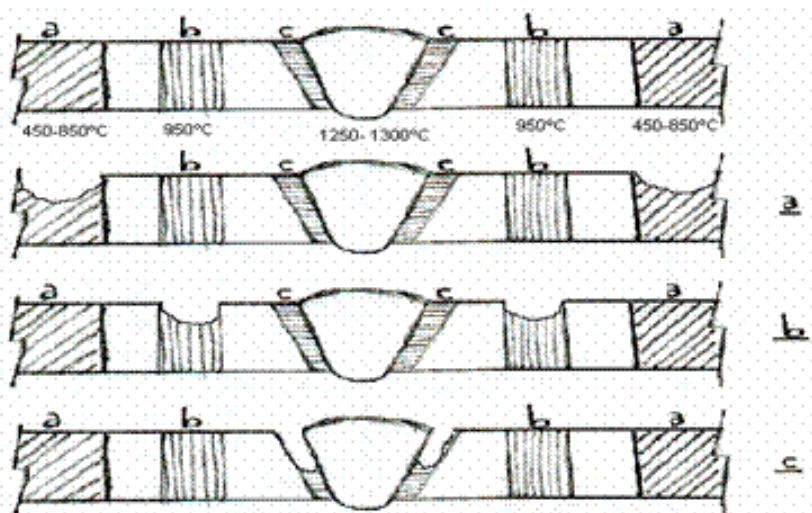


FIGURA 26: Esquema de diferentes casos de aceros inoxidables soldados con sensibilidad a la corrosión en línea de cuchillo mostrando la ubicación de los cráteres provocados en: a) acero inoxidable austenítico; b) acero inoxidable ferrítico; c) acero inoxidable austenítico estabilizado o desensibilizado.

**Corrosión selectiva de la fase ferrita delta del cordón:** la ferrita delta tiene una función metalúrgica en la soldadura de los aceros inoxidables austeníticos para evitar la fisuración en caliente del cordón. En general la resistencia a la corrosión de los metales de soldadura austenoferríticos es tan buena como la del metal base de la misma composición. En algunos casos el contenido de ferrita presente en el metal de soldadura puede tener influencia decisiva en la resistencia a la corrosión de este último por poseer una composición química diferente de la fase austenítica que la rodea. Puede suceder que en medios reductores y cuando el acero no está pasivado, la ferrita del metal de soldadura por poseer mayor cantidad de cromo en solución, sea atacada con mayor rapidez que el metal base y que la matriz austenítica. Sin embargo, en estos medios la corrosión actúa con la misma velocidad elevada tanto sobre el metal de la soldadura como sobre el metal base. En general se observa que los cordones austenoferríticos son más corrosibles que aquellos totalmente austeníticos.

**Decapado y pasivado post soldadura:** el decapado tiene por objeto remover los residuos del proceso de soldeo provocados por las altas temperaturas (óxidos) y por las condiciones de operación (impurezas). Como ya se comentó, en la ZAC se produce una reducción del contenido de cromo del metal base disminuyendo la capacidad anticorrosiva original. El decapado se realiza con soluciones acuosas de ácidos nítrico y fluorhídrico. Cuando las piezas son pequeñas se sumergen a temperatura ambiente en cubas conteniendo el decapante. El proceso se acelera con el aumento de la temperatura la que en algunos aceros inoxidables puede llegar a 60°C. Para el decapado interno de cañerías y recipientes se hace circular el decapante por su interior, evitando el contacto con partes susceptibles a ser dañadas por corrosión. Los tiempos de exposición al decapante varían entre 10 y 20 minutos; períodos superiores pueden aumentar peligrosamente la rugosidad superficial del acero. El pasivado se practica posteriormente al decapado. Se utilizan reactivos similares a los de decapado y su función es reestablecer la pátina de óxido de cromo. El pasivado final dará mejor resultado cuando se realice inmediatamente después del decapado pues la superficie se encuentra sumamente activa y reaccionará rápidamente al baño.

## CONCLUSIONES

Durante este breve recorrido por los procesos corrosivos que más afectan a los aceros inoxidables se pudo observar que existen soluciones para cada forma de deterioro. La diversidad de aleaciones, de procesos para revertir situaciones adversas y de precauciones relativamente fáciles de

llevar a cabo, ubica a estos aceros en la fuente de selección permanente para las diversas aplicaciones vinculadas no solo con la resistencia a la corrosión sino también con solicitaciones mecánicas. La amplia oferta de aceros inoxidable desde los tradicionales “18/8” pasando por los primitivos y nuevos duplex hasta los modernos económicos por reemplazo de cromo y níquel, presentan a estas aleaciones como alternativa a un sin fin de usos con riesgos corrosivos como la industria química y petroquímica, la extracción de hidrocarburos, las centrales termoeléctricas y núcleo termoeléctricas, la industria de la celulosa y el papel, la industria alimenticia y la industria textil de los hilados naturales y sintéticos. Paradójicamente, su principal atributo se debe a la posibilidad de ser atacados por factores oxidantes débiles que desarrollan la tan preciada pátina protectora de óxido de cromo en su superficie. Es esa pátina la que hay que proteger y mejorar con el objeto de desarrollar nuevas aleaciones y mejorar sus indiscutibles virtudes.

## BIBLIOGRAFÍA

- R. E. Reed-Hill, Principios de Metalurgia Física, Ed. C.E.C.S.A., 1979.
- N. Lindelvald, La Estructura de los Metales, Ed. Prensa Universitaria Argentina, 1972.
- J. A. Pero-Sanz Elorz, Materiales Metálicos, Ed. Dossat, 1988.
- J. D. Verhoeven, Fundamentos de Metalurgia Física, Ed. Limusa, 1987.
- A. Jackson, Fabricación de aceros al oxígeno, Ed. Urmo, 1966.
- J. Cahn, Physical Metallurgy, Ed. J. Wiley.
- G. Dieter, Metalurgia Mecánica, Ed. Aguilar, 1967.
- Hume, Rothery, The Structure of Alloys of Iron, Ed. Pergamon Press.
- W. F. Smith, Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales, Ed. Mc Graw Hill, 1996.
- F. N. Rhines, Phase diagrams in metallurgy, Ed. Mc Graw Hill.
- J. Apraiz Barreiro, Aceros Especiales, Ed. Dossat, 1975.
- D. Séférián, Metalurgia de la Soldadura, Ed. Tecnos, 1962.
- J. Palma y R. Timerman, Ciencia y Técnica de la Soldadura, Ed. Conarco, 1983.
- A. G. Guy, Physical Metallurgy for Engineers, Ed. Addison-Wesley, 1962.
- Corrosion, Volume 13, ASM (American Society for Metals), 2001.
- Alloy phase diagrams, Volume 3, ASM (American Society for Metals), 2001.
- Metallography and microstructures, Volume 9, ASM (American Society for Metals), 2001.
- Stainless steel, ASM (American Society for Metals), 1994.
- D. Askeland, Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Ed. Thomson, 1998.
- Nickel base alloys combat corrosion, Advanced Materials and Processes, 1995.
- Stainless steels for your projects, Creusot-Loire Industrie, G. Usinor, Buenos Aires, 1995.
- Simposio técnico sobre la industria del papel y la celulosa, Corrosión de los aceros inoxidables, Sandvik Argentina, 2º edición, agosto 1982.
- J. J. Podestá, Fenómenos de corrosión en planta, INIFTA, 1978.
- G. A. Cragolino, Corrosión bajo tensiones, CNEA, 1972.
- R. S. Archer, J. Z. Briggs, C. M. Loeb Jr., Molybdenum, Climax Molybdenum Company, 1970.
- J. Lefebvre, Guidance on specifications of ferrite in stainless steel weld metal, Doc. IX-1695-92, IIW, 1992.
- Programa de tecnología de los aceros inoxidables, M. Solari y otros, LEMIT – CIC, 1996.