

Desgaste y fallas en aceros de colada de Pb

Edmundo Tolabín¹, Teresa Antequera¹, Edith A. Gareca¹, Leonardo Maclis¹

(1) *Laboratorio de Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Jujuy.*
etolabin@fi.unju.edu.ar

RESUMEN: En procesos de alta temperatura de aleaciones Pb-Ag, se utilizan embudos de colada de aceros aleados. La integridad de estos componentes depende de la relación microestructura-propiedades del acero. En el presente trabajo se estudia el desgaste y fallas de tipo fisuras que se generan en aceros austeníticos y ferríticos (con diferentes propiedades físicas, químicas y microestructurales), en contacto con metal líquido (ML) constituido por Pb-Bi-Sb-Cu-Ag. Se tiene en cuenta la acción del calor y la fragilización por metal líquido. Se plantea mediante un modelo, el mecanismo de generación y propagación de fisuras. En base a la investigación desarrollada, se establecen las características del acero que permitiría lograr mayor durabilidad en servicio.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 *Condiciones de servicio y objetivos*

En el proceso de fusión de Sulfuro de Plomo (PbS), una etapa importante es la colada del ML que se produce a 850-900 °C. La composición de ML está constituida por Bi (500 ppm); Sb (800 ppm); Cu (2000-4000 ppm); Ag (3500-4000 ppm) y Pb. El régimen de colada es de 80 veces por día (una cada 15 minutos). El tiempo total de colada por día es de 1 hora 30 minutos. Se obtiene alrededor de 450 kg de metal colado por minuto. Esto se traduce en alto rozamiento del ML sobre las paredes del embudo, grandes tensiones (presión elevada de metal líquido contra el acero del embudo) e impulsa estados de corrosión bajo tensión. El embudo opera con un gradiente de temperatura de 450° C. Esto también contribuye a la generación de fallas de tipos fisuras.

En estos procesos, se considera que una durabilidad en servicio de 4 a 6 meses, es razonable y conveniente (Jonas, 2000). Por lo tanto la situación existente (que limita la vida útil del embudo de colada a 1 mes), genera un gasto excesivo por el uso de una gran cantidad de estos elementos (embudos fabricados en aceros de alta aleación) y ocasiona una gran pérdida de tiempo para el recambio (16 horas en total). Para la tarea de reemplazo, se debe esperar que la temperatura baje a 70 °C. Luego se quita el embudo fisurado, se coloca uno nuevo y se pone en régimen de trabajo la totalidad del sistema de colada (precalentamiento).

El gasto excesivo en material de construcción de los embudos se debe a que las aleaciones utilizadas contienen 20 % de níquel y 24 % de

cromo y que el peso del embudo es de 25 kg. Aún más incidente es el costo debido al tiempo utilizado para el recambio del embudo fisurado dado que implica improductividad.

El estudio se ocupó en primera instancia de relevar datos del problema. Luego se planteó el cambio de aleación y fabricación de los embudos. Finalmente se realizaron pruebas en servicio, donde se lograron mejoras significativas. Se considera que por medio de la investigación y experimentación es posible incrementar el rendimiento de los elementos estudiados. Por lo tanto queda planteada esa nueva etapa de optimización.

1.2 *Fallas en embudos de colada*

El acero que se utiliza habitualmente para la colada del ML es de matriz austenítica. Se trata de un acero inoxidable AISI 310. Esto se basa en know how existente que define la aleación a emplear en la fabricación de los embudos. Debido a la baja durabilidad en servicio se decidió realizar el presente estudio, teniendo como objetivo principal la obtención de un componente de mayor rendimiento.

Los parámetros evaluados para lograr las citadas mejoras son la pérdida de espesor y la formación de fisuras por acción del ML.

Para el caso se seleccionó un acero aleado de matriz ferrítica, teniendo en cuenta el contenido de elementos de aleación (con mayor contenido de cromo y carbono, sin níquel), el tamaño de grano (grande, n° 4/5 ASTM E112), tipo y ubicación de microfases presentes y nivel de inclusiones no metálicas.

El uso de aleaciones austeníticas y ferríticas implica la presencia del microconstituyente de

tipo carburos (Cr_7C_3) y perlita ($Fe\alpha+Fe_3C$), en borde de grano (Honeycombe, 1981). Esta microfase cataliza las reacciones de corrosión por metal líquido por lo que en lo posible se debe evitar su formación en las diferentes etapas de fabricación de las aleaciones.

1.3 Metodología de trabajo

El caso de mantenimiento industrial como el que se presenta con el problema de modificación de embudos metálicos de colada, tendiente a lograr mayor durabilidad e integridad en servicio, en general no se encuentra delineado en normas. Este caso tiene características particulares que imponen la implementación de una tarea de investigación y experimentación que permita lograr la solución adecuada. Para el tratamiento del problema de reemplazo de estos elementos se aplicó el siguiente plan de acción:

- Caracterización del acero inoxidable austenítico utilizado y de la falla detectada (fisuras).
- Medición del desgaste (pérdida de espesor).
- Preparación de la aleación alternativa de tipo ferrítico, con determinadas características.
- Definición de condiciones de fabricación (proceso de horno de inducción, método de colada, tipo de molde, velocidad de solidificación, tratamiento térmico, puesta en servicio).
- Caracterización de microestructura y propiedades de la aleación ferrítica luego de la formación de fisuras por acción del ML.
- Evaluación del comportamiento en servicio de ambas aleaciones.

2 DESARROLLO

2.1 Componente con fallas

Los embudos originales se construyeron con acero inoxidable austenítico AISI 310, en horno de inducción.

Se utilizaron moldes de arena precalentados a 200 °C para la colada.

Tratamiento térmico: Hipertemple (calentamiento a 1050 °C, mantenimiento a temperatura de austenización 3 horas y enfriamiento a alta velocidad en agua).

En Tabla 1 se presentan la composición química de una partida de 10 embudos de colada.

Tabla 1. Check análisis de acero AISI 310

Análisis químico AISI 310 (% en peso)						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0.21	0.33	0.83	0.011	0.016	23.7	19.9

Dimensiones del embudo: 40x25x25 cm.

Peso: 25 kg.

Espesor promedio en conducto de colada: 25 mm

Propiedades mecánicas (Tabla 2)

Tabla 2. Propiedades mecánicas de AISI 310

Materiales	Dureza HB	Alargamiento (%)	Resistencia máxima (N/mm ²)
Acero AISI 310	240	40	660

En la Fig. 1, se observa un componente con fisuras.

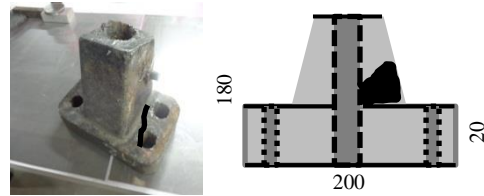


Figura 1. Ubicación de la zona de falla y observación de las fisuras por medio del ensayo de tintas penetrantes (medidas en mm).

Por metalografía se realizó la evaluación del contenido de inclusiones (Tabla 3).

Tabla 3. Inclusiones no metálicas AISI 310.

Inclusiones no metálicas ASTM E45			
Óxidos	Sulfuros	Silicatos	Aluminatos
2	2	3	3

La microestructura de estos embudos antes de la puesta en servicio se observa en la Fig. 2.

Granos de austenita ($Fe\gamma$) Perlita ($Fe\alpha+Fe_3C$)



Figura 2. Los bordes de grano de la austenita muestran presencia de microfases de tipo Perlita. A pesar de haber aplicado hipertemple, se observan precipitados en borde grano (Perlita). No hay presencia de microfases dentro de los granos de austenita.

En presencia de Pb, este tipo de carburo (Fe_3C), no es estable (De Van, 1985) y reacciona a alta velocidad con el ML.

2.2 Componente de acero aleado ferrítico

Con el incremento del contenido de cromo en una aleación de matriz ferrítica y un tratamiento térmico de recocido se logra mayor estabilidad de los carburos Fe_3C (Asher, 1977). En realidad lo mejor es evitar la presencia de Perlita y otros tipos de precipitados en borde de grano. Teniendo en cuenta recomendaciones para la aplicación de aceros aleados ferríticos (Kayser, 1997), se emplearon embudos fabricados en AISI 446. La composición química se presenta en Tabla 2.

Tabla 2. Análisis de acero moldeado AISI 446.

Análisis químico AISI 446 (% en peso)						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0.43	0.37	0.92	0.009	0.,022	29.1	-

Se aplicó marcha de bajas inclusiones en horno de inducción. El contenido de inclusiones no metálicas se presenta en Tabla 3.

Tabla 3. Inclusiones no metálicas AISI 446

Inclusiones no metálicas ASTM E45			
Óxidos	Sulfuros	Silicatos	Aluminatos
1	1	2	1

El nivel de inclusiones no metálicas es de mejor calidad que el de los aceros austeníticos. Este también es un factor de importancia para la durabilidad e integridad de los embudos.

Colada en molde de arena con enfriamiento rápido para evitar precipitación de microfases (desmoldeo a $500\text{ }^\circ\text{C}$ y aplicación de ventilación forzada).

La microestructura de estos aceros se observa en la Fig. 3. Está formada por granos de $Fe\alpha$, sin microfases en borde grano.



Figura 3. Granos de Ferrita α en aceros inoxidables tipo AISI 446.

El análisis metalográfico indica que no hay presencia de microfases en borde de grano en piezas terminadas, antes de ser montadas en el sistema de colada de las aleaciones de Pb.

Propiedades mecánicas. En Tabla 4 se dan los valores de las propiedades mecánicas del acero AISI 446 (ferrítico).

Tabla 4. Propiedades mecánicas

Materiales	Dureza HB	Alargamiento (%)	Resistencia máxima (N/mm^2)
Acero AISI 446	300	16	580

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Propiedades

Para el cálculo del porcentaje de cromo equivalente (Cr_{equiv}) y níquel equivalente (Ni_{equiv}), de ambas aleaciones se aplican las ecuaciones (1) y (2):

$$Cr_{equiv} (\%) = \%Cr + \%Mo + 1.5\%Si \quad (1)$$

$$Ni_{equiv} (\%) = 30\%C + \%Ni + 0.5\%Mn \quad (2)$$

En la Fig. 4, se tiene la ubicación de cada aleación en el diagrama de Schaeffler.

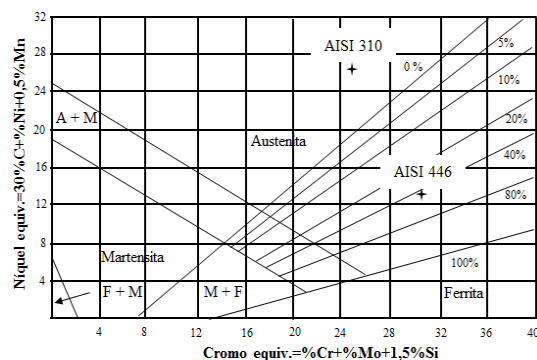


Fig. 4. Ubicación de las aleaciones en el diagrama de Schaeffler.

Se observa que el acero austenítico no contiene Ferrita δ (ferrita delta). En cambio el acero AISI 446 contiene alrededor de 60 % de Ferrita δ .

Es importante destacar la importancia de la presencia de Ferrita δ , dado que es mejor conductor del calor que la austenita y tiene menor coeficiente de expansión térmica. Esto también contribuye a la durabilidad del acero.

Desgaste: En el estado de fisuración (final de la pieza en servicio), los menores espesores medidos fueron los siguientes:

Acero AISI 310: 22 mm

Acero AISI 446: 16 mm

Otros factores que inciden en el comportamiento en servicio son la conductividad térmica y el coeficiente de expansión térmica. En Tabla 5 se dan los valores de cada acero (Tolabín, 2008).

Tabla 5. Coeficiente de expansión térmica k y conductividad térmica α_l .

	AISI 446	AISI 310
k	$= 0.50 \frac{J.cm}{^{\circ}C.cm^2.s}$	$= 0.15 \frac{J.cm}{^{\circ}C.cm^2.s}$
α_l	$= 1.17E - 0.5/^{\circ}C$	$= 1.73E - 0.5/^{\circ}C$

3.2 Microestructura

El estudio de la microestructura de aceros inoxidable austeníticos de tipo AISI 310, en zona de falla muestra la presencia de fisuras por borde de grano luego de un mes de funcionamiento en servicio (Figura 5).

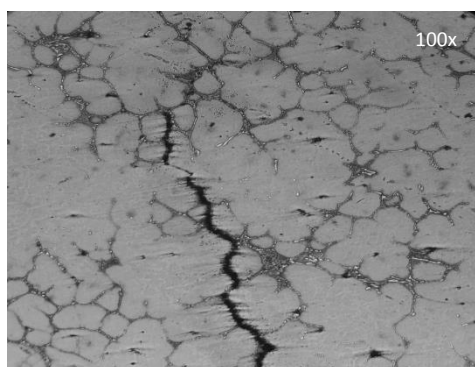


Figura 5. Fisuras por borde de grano en acero austenítico AISI 310.

En el acero ferrítico AISI 446, las fisuras aparecen luego de seis meses de servicio. En la Fig. 6 se observa la decohesión intergranular.

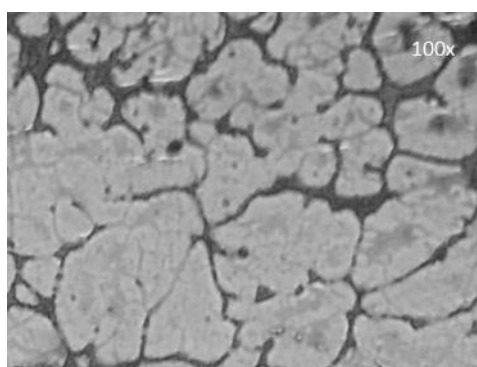


Figura 6. Decohesión intergranular en acero ferrítico AISI 446.

3.3 Análisis en SEM-EDAX

A fin de determinar el tipo de microfases presentes en la zona intergranular, se realizó estudio en microscopio electrónico de barrido con analizador. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Acero inoxidable austenítico AISI 310. En la Fig. 7 y 8, se observa zona de microanálisis.

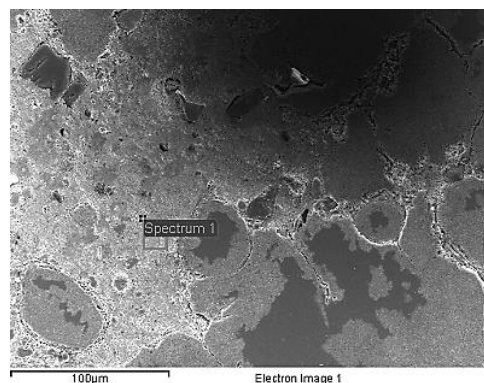


Figura 7. Microfases en borde de grano en acero austenítico AISI 310.

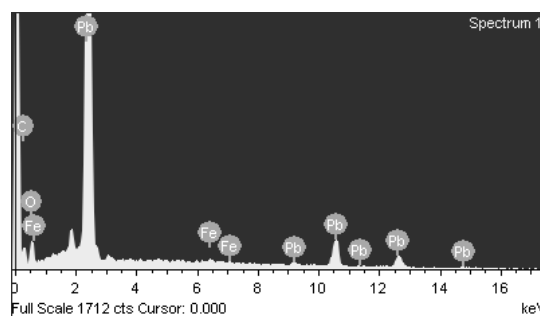


Figura 8. Espectro de microanálisis acero AISI 310. Se observa presencia de Pb y carburos de hierro en la región de fisura intergranular.

Acero inoxidable ferrítico AISI 446. En la Fig. 9 y 10, se observa microanálisis en zona de falla.

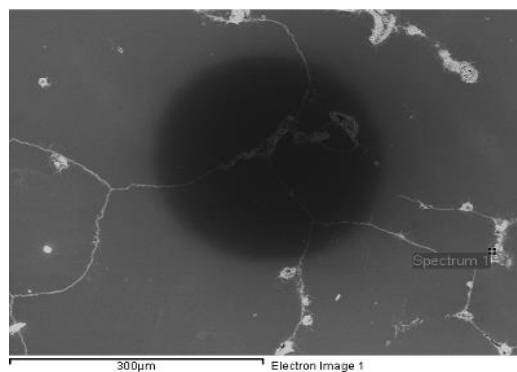


Figura 9. Microfases en borde de grano en acero ferrítico AISI 446. La cantidad de microfases presente en borde de grano es menor que el caso del acero austenítico AISI 310.

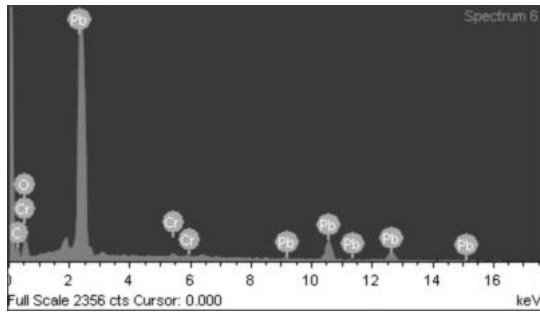


Figura 10. Espectro de microanálisis acero AISI 440. Se observa presencia de Cr y Pb en la región intergranular. No hay Perlita.

3.4 Modelo de corrosión por ML

El mecanismo de fragilización por ML implica el efecto de tensiones localizadas y disolución del sólido cuando avanza la microfisura. Esto se debe a la disminución de la energía de cohesión intergranular en forma localizada lo que potencia el avance de la fisura. En la Fig. 11, se detalla el mecanismo de generación y propagación de las fisuras.

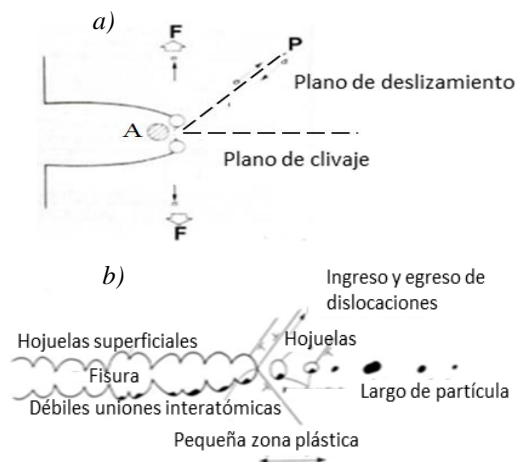


Figura 11. a) Inicio de la fisura. A: partícula que penetra en la microestructura. F: fuerzas de ensanchamiento. P: Fuerza resultante b) Propagación.

El modelo planteado pone de manifiesto la importancia del tamaño de grano. En el caso de tamaño de grano grande (n° 4/5 ASTM E112), el acero presenta menores vías de entrada del ML (Kamdar, 1992).

En caso de disponer de una aleación sin la presencia de microfases en borde de grano y grano grande, se tiene una mejor condición de respuesta a las sollicitaciones térmicas, mecánicas y químicas que impone el ML.

4 CONCLUSIONES

- El acero AISI 310 presenta menor desgaste en el momento en que se genera la fisura pasante que inutiliza el embudo. Esto indica que el mecanismo de daño actuante por ML, en mayor grado es el ataque químico (corrosión) y no el desgaste por rozamiento.
- En el acero ferrítico AISI 446, se nota que el desgaste por condiciones de servicio (rozamiento de ML), es menor que en aceros austeníticos.
- La acción de ML como medio de corrosión, es más nocivo en el caso del acero AISI 310.
- El uso de un acero de matriz ferrítica, con alto contenido de cromo, mejora la durabilidad de los embudos de colada. El cromo a altas temperaturas mejora la resistencia a la corrosión. En este caso el níquel no contribuye a la durabilidad e integridad.
- En la elaboración del acero austenítico, la presencia de la microfase Perlita es altamente incidente en la durabilidad del componente.
- El ataque por metal líquido es más deteriorante en presencia de microfases en borde de grano.
- El acero inoxidable ferrítico AISI 446, que contiene alto cromo (29 %), es menos sensible a la corrosión por ML que un acero austenítico.
- Es importante que el tamaño de grano sea grande. El acero en esta condición presenta mejor respuesta al ataque por metal líquido que en el caso de grano fino.
- La durabilidad lograda con una aleación de matriz ferrítica es seis veces mayor que con aceros aleados austeníticos. Este rendimiento es factible de ser mejorado mediante estudio del proceso de fabricación de los embudos.
- Las propiedades físicas de los aceros de matriz ferrítica dan una cierta tendencia a un mejor comportamiento en servicio que los aceros de matriz austenítica si se tiene en cuenta el efecto de la conductividad térmica y coeficiente de expansión lineal.
- El microanálisis de las zonas de decohesión intergranular indican que el elemento que genera corrosión por metal líquido es el Pb que se acentúa en presencia de Perlita en borde de grano.
- El modelo de corrosión por ML, ayuda a comprender el mecanismo actuante en el deterioro y degradación del acero.

5 REFERENCIAS

- Asher, R. C. & D. Davis, Some Observations on Compatibility of Structural Materials with Molten Lead, *Corrosion Science*, USA, 545-547, 1977.

- De Van, J. H. & C. Bagnall, In Proceedings of the international conference on Liquid Metal Engineering and Technology. *The British Nuclear energy Society*, UK, 65-72, 1985.
- Honeycombe, R. W. K., Austenitic Steels. *Microstructure and Properties of Steels*, Cambridge, UK, 35-45, 1981.
- Jonas, S. Liquid Metal Attack. *Corrosion Source*, USA, 21-29, Nov. 2000.
- Kamdar, M. H., Embrittlement by Liquid and Solid Metals, *American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers*, USA, 122-134, 1984.
- Kayser, F. X. & Y, Sumitomo, Environmentally Induced Cracking, *Journal of Phase Equilibria*, Vol. 18, N° 5, UK, 52-61, 1997.
- Tolabín, E., E. Gareca, & T. Antequera, Efecto de carburos precipitados en las propiedades mecánicas de aceros inoxidable austeníticos extra bajo carbono, *Investigación en Facultades de Ingeniería del NOA*, Argentina, 2008.