



Reducción de la fase de ferrita en aceros inoxidable austeníticos mediante el control del contenido de equivalentes de Cr-Ni

Reduction of ferrite phase in austenitic stainless steels by controlling content of Cr-Ni equivalent

Ruiz Ochoa Juan Antonio ¹, Ramos Azpeitia Mitzuo Osvaldo², Castañeda Robles Iván Erick ³,
Hernández Rivera José Luis ⁴, Paz González Juan Antonio ¹

¹Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología. Universidad Autónoma de Baja California. Blvd Universitario 1000, Unidad Valle de las Palmas, 22260 Tijuana, Baja California, México

²Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Av. Dr. Manuel Nava No.8 Edificio P, Zona Universitaria, 78290, San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.

³Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5, 42184, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México

⁴CONACYT-Instituto de Metalurgia-Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Sierra Leona 550, Lomas 2da Sección. 78210. San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.

Autor de correspondencia: Dr. Juan Antonio Ruiz Ochoa, Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología. Universidad Autónoma de Baja California. Blvd Universitario 1000, Unidad Valle de las Palmas, 22260 Tijuana, Baja California, México. E-mail: ruizj99@uabc.edu.mx. ORCID: 0000-0003-0826-3799.

Recibido: 26 de Junio del 2019 **Aceptado:** 19 de Septiembre del 2019 **Publicado:** 30 de Septiembre del 2019

Resumen. - *Los aceros inoxidable austeníticos AISI 316L son muy comunes en la industria. Grandes cantidades de este material se desechan como chatarra y pueden utilizarse posteriormente como material reciclado para la colada. En ambientes marinos (altamente corrosivos), este tipo de acero presenta corrosión intragranular, específicamente en una de sus fases, en la ferrita, por lo que se prefiere mantenerla en la menor proporción posible (<1%), pero normalmente se encuentra alrededor del 12%. Si se requiere que una pieza de fundición de acero AISI 316L transporte un fluido presurizado, debe realizarse de acuerdo con las consideraciones descritas en la norma ASTM A351. En este trabajo, se encontró que el acero CF3M tiene mayor solicitud en términos de proporciones químicas elementales de sus componentes. Por lo tanto, se utilizaron los diagramas de Schaeffler y Schoefer para reducir el contenido de "ferrita equivalente" en al menos el 90%, haciendo ajustes en la fundición modificando los porcentajes de Ni y Cr.*

Palabras clave: Aceros Inoxidable Austeníticos; Ferrita; Diagrama de Schaeffer; Diagrama de Schoefer.

Abstract. - *AISI 316L austenitic stainless steels are very common in the industry. Large amounts of this material are discarded as a chisel and can subsequently be used as recycled material for casting. In marine environments (highly corrosive), this type of steel presents intragranular corrosion, specifically in one of its phases, in the ferrite, so it is preferred to keep it at the lowest possible proportion (<1%), but usually it is found around the 12% of it. If a casting is required to transport a pressurized fluid from AISI 316L steel, it should be performed according to considerations described in ASTM A351 Standard. We find that CF3M steel is the most similar in terms of elemental chemical proportions of its components. Therefore, the Schaeffler and Schoefer diagrams were used to reduce the content of "equivalent ferrite" by at least 90%, making adjustments in the casting by modifying the Ni and Cr percentages.*

Keywords: Austenitic Stainless Steels; Ferrite; Schaeffler Diagram; Schoefer Diagram.



1. Introducción

Cuando es necesario proveer de buena protección a la corrosión intragranular, con un buen comportamiento mecánico en piezas de aceros inoxidable austeníticos sujetas a ambientes altamente corrosivos, como lo es el marino, se requiere tener especial cuidado de la composición química, así como de la tasa de enfriamiento durante la solidificación [1], por lo que podemos obtener aceros austeníticos con baja presencia de la fase delta ferrita, en el orden de 1 % o menor, lo cual representa un valor muy bajo, considerando que estas aleaciones contienen alrededor del 10 % de esta fase dañina [2]. Esto es posible en una aleación de acero inoxidable austenítico procesado 316L [3-4] o en su similar de fundición, el acero CF3M [5] teniendo cuidado, como se mencionó antes, en la tasa de enfriamiento y controlando la relación entre el cromo y el níquel equivalente, los cuales promueven la formación de la fase ferrítica. Utilizando los Diagramas de Schaeffler [6] y Schoefer [7], podemos correlacionar esta interacción para predecir la formación de la fase delta ferrita. Adicionalmente, se compara los valores de ferrita calculados con los que se proponen en una aleación, que, finalmente, se obtiene físicamente para corroborar tanto la fase ferrita obtenida como las propiedades mecánicas que determinarán el comportamiento para su aplicación en específico.

2. Metodología

Se realizó una investigación documental sobre el acero inoxidable austenítico 316L, y sobre la aleación CF3M, que es la aleación de fundición equivalente al 316L. Tomando en cuenta la composición de ambas aleaciones, según sus respectivas normas, se estimó el contenido de ferrita, de acuerdo a la metodología en su obtención mediante los Diagramas de Schaeffler y Schoefer. Se calcularon los valores teóricos de propiedades mecánicas en aleaciones hipotéticas y se obtuvieron los valores reales de una muestra

propuesta. Se corroboraron los datos obtenidos mediante Espectrometría de Chispa y Microscopía Óptica.

2.1. Estimación del contenido de Ferrita Equivalente de acuerdo a Schaeffler.

Para la estimación de la Ferrita Equivalente, se obtienen los valores de Cr equivalente (Cr_{eq}) y de Ni equivalente (Ni_{eq}), mediante las siguientes ecuaciones:

$$Ni_{eq} = \% Ni + 30 (\% C) + 0.5 (\% Mn) \quad (1)$$

$$Cr_{eq} = \% Cr + \% Mo + 1.5 (\% Si) + 0.5 (\% Nb) \quad (2)$$

Nótese que los valores obtenidos dependerán de las concentraciones de otros elementos químicos, tales como el C y/o el Mo.

Una vez estimados ambos valores, se ubican en el “diagrama de Schaeffler” y se observa en qué recta diagonal se localiza el punto de intersección, el cual representa la predicción del % aproximado de la(s) Fase(s) en la aleación.

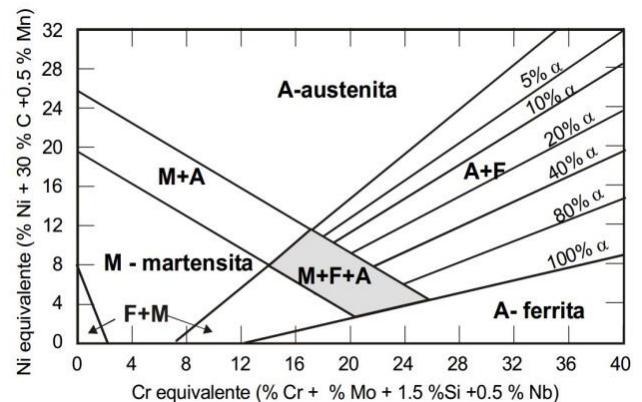
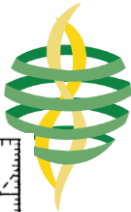


Figura 1. Diagrama Schaeffler empírico de predicción de fases en el acero de acuerdo a las concentraciones de Cr, Mo, Si, Nb, Ni, C y Mn.

La importancia de dicho diagrama reside en el hecho de que podemos ubicar la Ferrita α .



2.2. Estimación del contenido de Ferrita Equivalente de acuerdo a Schoefer.

Schoefer propone una manera similar a la metodología llevada a cabo en la estimación de la Ferrita Equivalente propuesta por Schaeffler, en este caso, el factor C_{req}/N_{ieq} se obtiene mediante las siguientes ecuaciones:

$$N_{ieq} = \%Ni + 30 (\%C) + 0.5 (\%Mn) + 26 (\%N - 0.02) + 2.77 \quad (3)$$

$$C_{req} = \%Cr + 1.4 (\%Mo) + 1.5 (\%Si) + \%Cb - 4.99 \quad (4)$$

Una vez estimados ambos valores, se realiza la operación aritmética para obtener el factor C_{req}/N_{ieq} , el cual se ubica directamente en el “diagrama de Schoefer” y se observa horizontalmente el punto donde corta la curva, la cual representa específicamente la predicción del % aproximado de la fase Ferrita (volumen de ferrita).

2.3. Estimación del contenido de Ferrita Equivalente de los aceros CF3M y 316L.

En la Tabla 1 se muestra tanto los porcentajes elementales como el cálculo de los % de Ferrita de los aceros austeníticos CF3M y 316L, de acuerdo a los rangos porcentuales de los elementos químicos que pueden variarse.

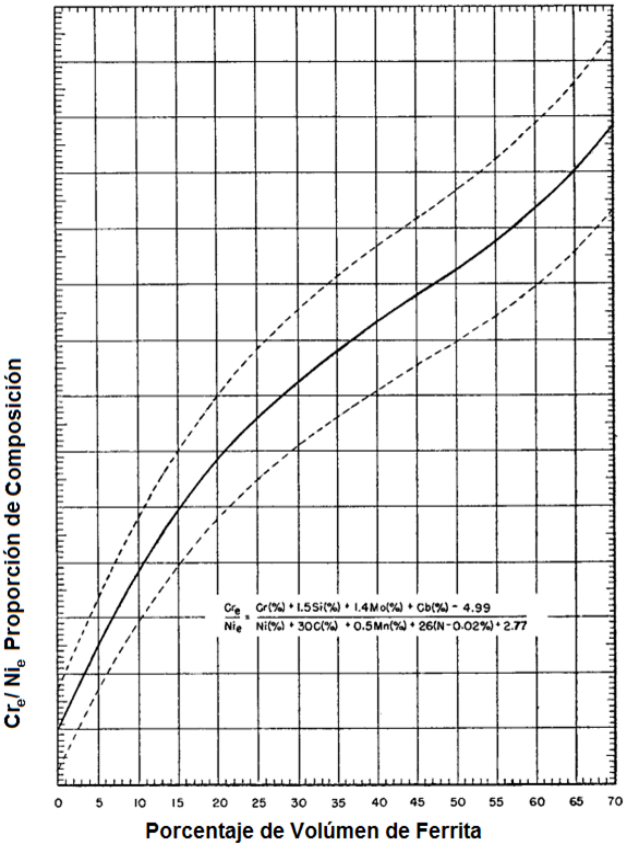


Figura 2. Diagrama Schoefer empírico de predicción de fases en el acero de acuerdo a las concentraciones de Cr, Mo, Si, Nb, Ni, C, Mn y N.

En ella se observa que los valores son mayores para los aceros CF3M que en los del acero 316L. Con base al diagrama de Schoefer se estimó que para obtener los valores de ferrita inferiores al 0.6 %, la relación C_{req}/N_{ieq} debe de ser preferentemente igual o menor a 0.9. Considerando un valor promedio en los elementos químicos del CF3M que pueden variarse, la relación C_{req}/N_{ieq} es del orden de 1.208, lo cual representa un 11 % Ferrita. Para disminuir la relación C_{req}/N_{ieq} es necesario disminuir los contenidos de los elementos Cr, Mo y Si y aumentar los contenidos de los elementos C, Ni y Mn.

Como parte de la estrategia de mantener los porcentajes de Ferrita bajos, se predice que las



propiedades mecánicas de dichas aleaciones deben de mejorarse, por lo tanto, en la literatura existen diversas ecuaciones para predecir las propiedades mecánicas en función de la composición, entre ellas se encuentran las siguientes:

$$\sigma_{ced} (0.2\%) = 120 + 2Mn + 2Cr + 14Mo + (6.15 - (0.054\% Ferrita)) \% Ferrita. \quad (5)$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 470 + 14Mo + 1.5\% Ferrita \quad (6)$$

$$\sigma_{ced} = 15.4 (4.4 + 23C + 1.3Si + 0.24Cr + 0.94Mo + 0.16\% Ferrita) \quad (7)$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 15.4 (29 + 35C + 2.4Si + 0.11Ni + 1.2Mo + 0.14\% Ferrita) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{ced} &= \text{Esfuerzo cedencia} \\ \sigma_{m\acute{a}x} &= \text{Esfuerzo m\acute{a}ximo} \end{aligned}$$

Tomando en cuenta las ecuaciones anteriores y los datos de las composiciones químicas de la Tabla 1 junto con la composición química de la propuesta hecha, se realizó el cálculo del esfuerzo máximo y el esfuerzo de cedencia de las aleaciones CF3M, 316L. Los resultados se presentan en la Tabla 2.

Se procedió a realizar una fundición con la composición propuesta para corroborar los datos mediante ensayos en una Máquina Universal de Ensayos de Tensión Shimadzu AG-X 100 kN.

Se realizó la caracterización microestructural de la aleación propuesta, y se comparó con una muestra de un acero comercial CF3M. Las muestras de ambas piezas fueron preparadas metalográficamente con etapas de desbaste con lijas de SiC y pulido con pastas de diamante de 3 y 1 mm. Posteriormente fueron atacadas con el reactivo Murakami (10g $K_3Fe(CN)_6$, 7 g de NaOH, 100 ml agua destilada) durante 3 minutos y se obtuvieron sus respectivas metalografías en un microscopio óptico Nikon Eclipse MA-100.

3. Resultados

Se propuso la siguiente composición para la aleación de acero austenítico: C=0.03, Si=0.6, Mn=1.5, Cr=17, Ni=13 y Mo=2.0. Con esta composición la relación C_{req}/N_{req} calculada es de 0.90, con lo cual se obtiene de 1.0-2.0 % aproximado de ferrita según el diagrama de Schoefer. Considerando que generalmente las cuantificaciones de ferrita son menores a los valores predichos por los diagramas de Shaeffler y Schoefer, se pensó que esta propuesta sería la adecuada.

Respecto a las propiedades mecánicas, de la Tabla 2 se observa que en la aleación propuesta presenta valores de σ_{ced} (calculados por las ecuaciones) menores a los que deben obtenerse, de acuerdo a la norma, sin embargo, el $\sigma_{m\acute{a}x}$ calculado por ambas ecuaciones es mayor al especificado por la norma.

Se procedió a la obtención de la muestra mediante el proceso de fundición en un horno de inducción, buscando obtener los porcentajes antes mencionados. La Tabla 3 presenta la composición final obtenida en una probeta, los porcentajes se obtuvieron del análisis en un Espectrómetro de chispa Spectrolab. Posteriormente, se calcularon sus propiedades mecánicas, las cuales también se incorporan en la Tabla 2.

Las micrografías obtenidas a 100X en las Figura 3 y 4, muestran que la microestructura está formada por una matriz de austenita (área blanca) con islas de ferrita (fases color café) y carburos finos dispersos homogéneamente en la matriz (puntos negros). La cantidad de ferrita fue mucho menor en el acero modificado en comparación con el acero CF3M convencional, como se puede observar ambas imágenes.

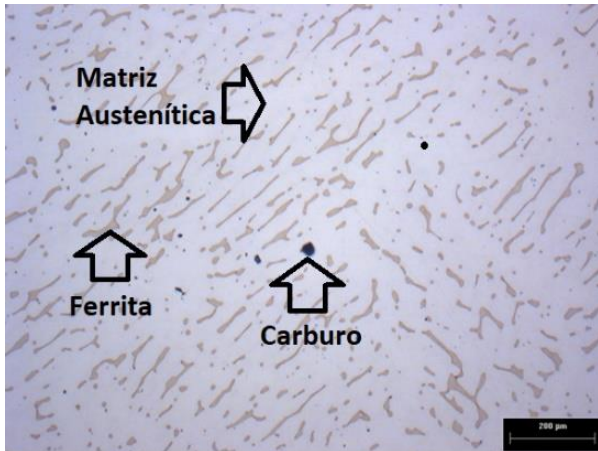


Figura 3. Micrografía de muestra de acero comercial CF3M.

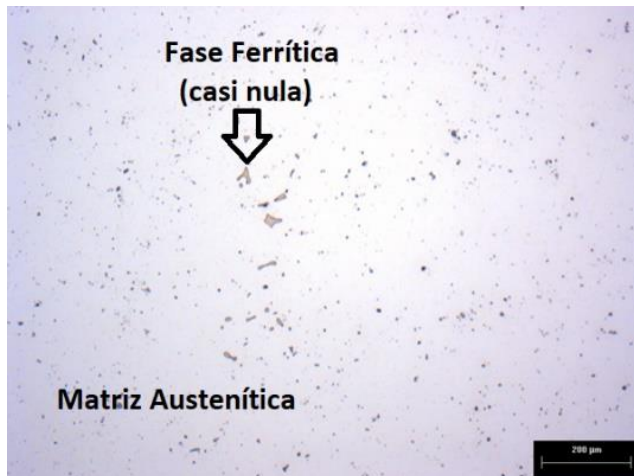


Figura 4. Micrografía de Acero Propuesto con menor contenido de Fase Ferrita.

Se realizó una cuantificación del contenido de ferrita en ambas microestructuras utilizando el método descrito en la norma ASTM E562-08. Se utilizó una malla cuadrículada con 100 puntos. El arreglo utilizado fue de 10 campos por línea y se usaron 3 líneas (30 campos). El espaciamiento fue de 2mm en la dirección horizontal y de 5mm en la dirección vertical. Una vez obtenidos los datos se procedió a realizar la cuantificación de la cantidad de ferrita utilizando las ecuaciones descritas en dicha norma. Los resultados se presentan en la Tabla 4.

3.1. Tablas

Tabla 1. Composición química y cálculo de ferrita para el acero 316L y su equivalente CF3M.

% Elemental	316L (ASTM A213)	CF3M (ASTM)
% C	0.035	0.03
% Si	1.0	1.5
% Mn	2.0	1.5
% Cr	16–18.5	17–21
% Ni	10–14	9–13
% Mo	2–3	2–3
% S	0.03	0.04
% P	0.045	0.04
% Ferrita (Shaeffler)	5–8	12–18
% Ferrita (Shoefer)	6–7	10–16

Tabla 2. Esfuerzos de cedencia y máximo en función de la composición química para el acero 316L y su equivalente CF3M.

Aleación	σ_{ced} (ec. 5) [MPa]	σ_{ced} (ec. 7) [MPa]	$\sigma_{máx}$ (ec. 6) [MPa]	$\sigma_{máx}$ (ec. 8) [MPa]
316L	Mayor a 205		Mayor a 485	
CF3M	Mayor a 205		Mayor a 485	
Aleación PROPUESTA (Empírico)	194.1	185.9	500.25	547.16
Aleación PROPUESTA (Real)		318.5		531

Tabla 3. Porcentajes de Elementos Químicos en Fundición de Aleación Propuesta

Elemento Químico	%
C	0.0198
Si	0.568
Mn	1.4
Cr	17.42
Mo	2.01
Ni	12.67
P	0.015
S	0.0019
Creq/Nieq	0.96
%Ferrita Estimada	3

Tabla 4. Resultados de la cuantificación de ferrita para la aleación CF3M con composición convencional y la aleación propuesta

Aleación	Volumen de ferrita estimado (intervalo de confianza 95%)	% de precisión relativa
CF3MConvencional	12.783 ± 0.948	7.412
Aleación Propuesta	0.317 ± 0.218	68.774



4. Conclusiones

La modificación de la composición química propuesta para el acero CF3M (C=0.03, Si=0.6, Mn=1.5, Cr=17, Ni=13 y Mo=2.0), cumple con los requerimientos de la norma ASTM para este tipo de acero y permite obtener microestructuras con un contenido de ferrita menor a 0.5%. La modificación de la composición propuesta permite obtener propiedades mecánicas iguales o superiores a las especificadas por la norma ASTM correspondiente a piezas de fundición.

Referencias

- [1] A.F. Padilha, and P.R. Rios, "Decomposition of austenite in austenitic stainless steels", ISIJ International Vol. 42, pp. 325 - 337, 2002. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.42.325>
- [2] ASTM A800/A800M-10, Standard practice for steel casting, austenitic alloy, estimating ferrite content thereof, American Society for Testing and Material, International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org
- [3] ASTM A240 / A240M-16a, Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
- [4] ASTM A666-15, Standard Specification for Annealed or Cold-Worked Austenitic Stainless Steel Sheet, Strip, Plate, and Flat Bar, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
- [5] ASTM A351 / A351M-16, Standard Specification for Castings, Austenitic, for Pressure-Containing Parts, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
- [6] C.J. Long, and W.T. DeLong, "The Ferrite Content of Austenitic Stainless Steel Weld Metal", Welding Research, AWS and WRC, pp. 281-291, 1973. https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_1973_07_s281.pdf
- [7] D.L. Olson, "Prediction of austenitic weld metal microstructure and properties", Weld Journal, Miami, Vol. 64:10, 281-295, 1984. http://files.aws.org/wj/supplement/WJ_1985_10_s281.pdf



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)