



DESARROLLO DE UN MODELO EXPERIMENTAL CON HORNO DE INDUCCION (HI) PARA PRODUCIR ACEROS INOXIDABLES DE BAJO % C \leq 0,03

A. Parada Expósito¹, G. Santibáñez², R. Morales Dávila³,
M. Ángeles Hernández³, E. Zumelzu⁴

¹CUJAE (Ciudad Universitaria José Antonio Echeverría), Habana, Cuba

²Fundición "OMAMET", Santiago, Chile

³División de Ingeniería Metalúrgica ESIQIE, IPN, Ciudad de México.

⁴Laboratorio de Materiales, Universidad Austral de Chile.

parada@mecanica.cujae.edu.cu

RESUMEN

El principal objetivo del proyecto fue preparar una instalación barata, sin grandes inversiones para producir aceros inoxidables (series "L" (ASTM), CF-3 o 304L; CF -3M o 316L) de bajo contenido de carbono (%C<0,03). En este trabajo el Horno de Inducción fue convertido en un reactor, inyectando Argón por el fondo con un tapón poroso y Oxígeno por la parte superior del baño líquido (superficie escoria-metal) por medio de una lanza a través de una tapa refrigerada con agua. La alta temperatura ayuda en la cinética de este proceso, pero tiene limitante por el daño a los refractarios. La construcción del modelo experimental y su evaluación se hizo en la fundición chilena "OMAMET" en un horno de inducción de 50 kg de capacidad con las adaptaciones correspondientes del tapón poroso, la lanza con la tapa refrigerada, se diseñó y se construyó un sistema de inyección de gases (Argón-Oxígeno-Nitrógeno). Se presentan en el trabajo los resultados obtenidos en la evaluación experimental, composición química, microcopia óptica y electrónica SEM, análisis de inclusiones, evaluación de las propiedades mecánicas, también una evaluación económica del proceso mediante aleaciones típicas producidas.

Palabras claves: Inoxidable, low-carbon, 316L, tapón poroso.

ABSTRACT

The main objective of the project was to prepare an inexpensive installation without major investment to produce stainless steel (series "L" (ASTM), CF-3 or 304L, CF-3M or 316) of low carbon content (% C <0.03). In this work the induction furnace was turned into a reactor, injecting Argon through the bottom with a porous plug and Oxygen on the top of the liquid bath (slag-metal surface) using a spear through a water-cooled lid. The high temperature helps in the kinetics of this process, but it is limiting by the damage to the refractory. The construction of the experimental model and its evaluation was done in the Chilean smelter "OMAMET" in an induction furnace of 50 kg of capacity with the corresponding porous plug adjustments. A system injection of gases (Argon-Oxygen-Nitrogen) and a spear with a cooled lid were designed and constructed. The results obtained in the experimental evaluation, chemical composition, electronic and optical microscope SEM, analysis of inclusions, evaluation of mechanical properties, and an economical evaluation are presented.

Keywords: Stainless, low-carbon, 316L, porous plug.

1. INTRODUCCIÓN

El principal objetivo del proyecto fue preparar un método y una instalación barata, sin grandes inversiones, para producir aceros inoxidables (series "L" (ASTM), CF-3 o 304L; CF -3M or 316L) de bajo contenido de carbono ($\%C < 0,03$). Las instalaciones costosas y clásicas para producir estas aleaciones son por ejemplo AOD (Converter Argon-oxygen-degassing) o VOD (Vacuum-oxygen-degassing).

Estos aceros inoxidables presentan como la mejor características la elevada resistencia a la corrosión ínter cristalina por sustancias ácidas donde el bajo $\%C$ tiene un especial significado al disminuir la posibilidad carburos de cromo, heterogeneidades en bordes de grano que provocan la disminución del cromo en esa zona y susceptible de la corrosión ínter cristalina.

En este trabajo el Horno de Inducción lo convertimos en un reactor, inyectando Argón por el fondo con un tapón poroso y Oxígeno por la parte superior del baño líquido (superficie escoria-metal) por medio de una

lanza través de una tapa refrigerada con agua.

El principio teórico y única forma de poder disminuir el contenido de carbono $\%C < 0,03$ de forma eficiente y sin oxidar cromo, es bajando la presión parcial en el sistema, que puede ser mediante el vacío, que es el caso del VOD, o la otra variante es inyectando Argón y Oxígeno que es el caso del AOD. La alta temperatura ayuda en la cinética de este proceso, pero tiene limitante por el daño a los refractarios. Se hizo una evaluación del proceso en un horno de inducción de 50 kg de capacidad, con las adaptaciones correspondientes del tapón poroso, la lanza con la tapa refrigerada y se diseñó y se construyó un sistema de inyección de gases (Argón-Oxígeno-Nitrógeno) se hicieron coladas experimentales, obteniéndose finalmente los diferentes ajustes del proceso, buenos resultados en las coladas 6 y 7. Se hizo la evaluación de las características de la aleación, composición química, microscopía óptica y electrónica SEM, análisis de inclusiones, evaluación de las propiedades mecánicas, también una evaluación económica del proceso.

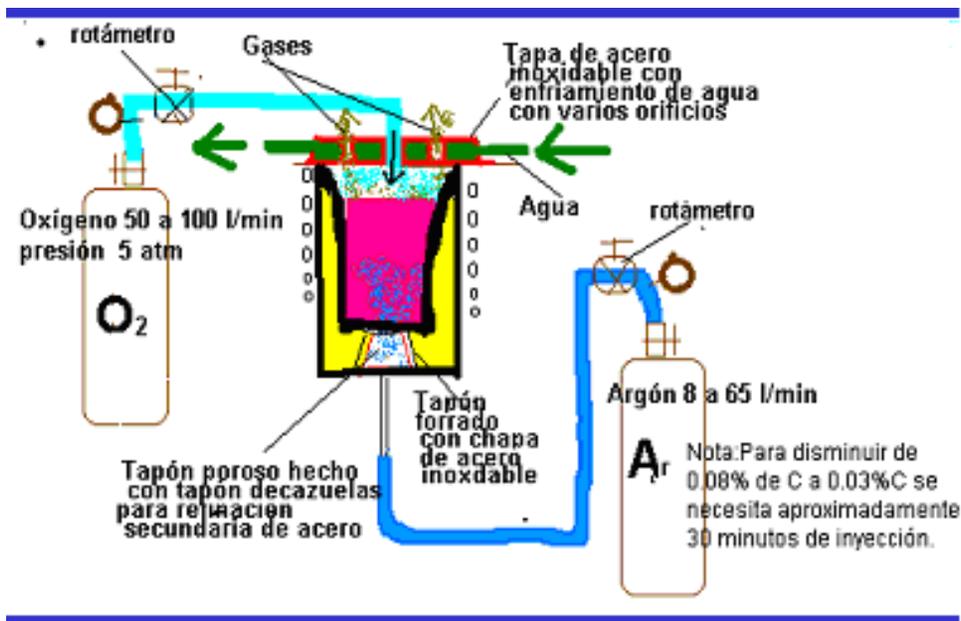
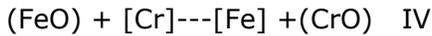
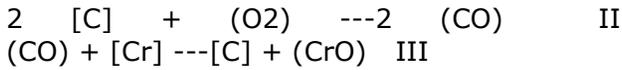
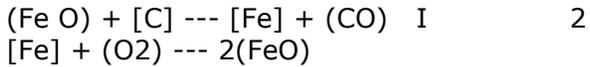


Figura 1. Esquema de instalación del Horno de Inducción Reactor con inyección de Argón por el fondo con un tapón poroso y Oxígeno por la parte superior del baño líquido con una lanza través de una tapa refrigerada con agua.

2. CONSIDERACIONES TEÓRICAS

Las reacciones más importantes del proceso son:



Como resultado de estas reacciones, el cromo se oxidará con el (FeO) óxido ferroso, Para disminuir las condiciones y evitar al máximo estas reacciones, es necesario trabajar con factores tecnológicos como son la temperatura. Esta razón termodinámica se muestra en la figura 2 [8]. Ejemplo: Para figura 2 (b) $K = (a[\text{Cr}] \cdot P(\text{CO})) / a[\text{C}]$.

La descarburación del metal es posible cuando el CO va fuera, esto ocurre cuando disminuye la presión parcial, al formarse las

2043 o K (1770 o C) y una presión normal del proceso de 1 atm la razón en equilibrio del [Cr] y [C] en el metal es $[\text{Cr}]/[\text{C}] = 100$, para 0,1 % [C], el contenido de [Cr] será de 10% en equilibrio con esas condiciones. Para un aumento de la temperatura de 2133 oK (1870 oC) la razón en equilibrio del [Cr] y [C] en el metal será $[\text{Cr}] / [\text{C}] = 200$, para 0,05 % [C], el contenido de [Cr] será de 10% en equilibrio con esas condiciones.

El aumento de la temperatura no es la solución por el gran deterioro del refractario que provoca las altas temperaturas.

La termodinámica muestra que con la reducción de la presión parcial en el proceso se obtienen mejores resultados en las relaciones de equilibrio,

burbujas de Argón y arrastrar el CO, la reacción se detiene cuando la presión parcial del CO es la misma que la presión atmosférica.

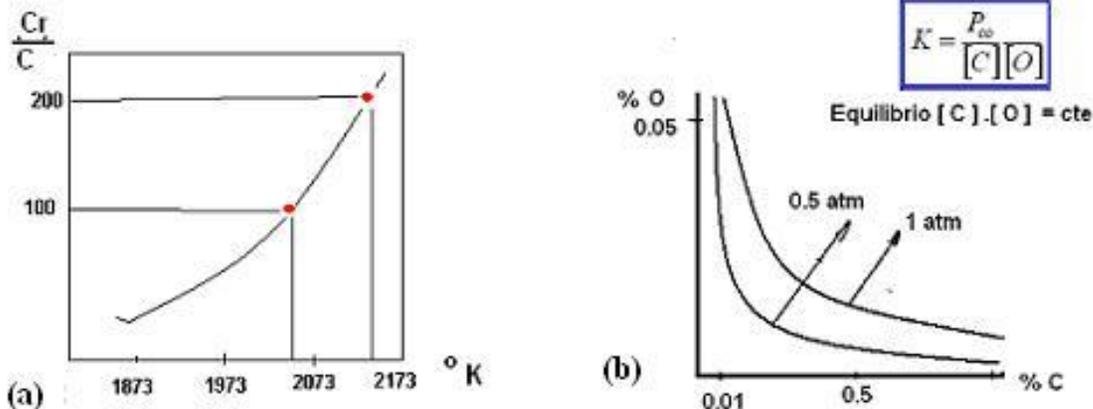


Figura 2. (a) Relación To K vs Cr / C; (b) Equilibrio [C].[O]

Figura 2 (b) Equilibrio [C].[O], cambia al reducirse la presión parcial. De acuerdo con Hilty [9], expresión que muestra el equilibrio: [C] carbono en el metal; [Cr] en el metal; temperatura del proceso y presión parcial de (CO).

$$4 \log \%[\text{C}] + (1432/T) \%[\text{C}] = 3 \log \%[\text{Cr}] + (160/T - 0,0476) \%[\text{Cr}] + 57100/T - 35,16 + 4 \log P(\text{CO}).$$

De acuerdo con esta ecuación de equilibrio se hace el gráfico figura 3 para diferentes presiones parciales y razones de Oxígeno/Argón y diferentes temperaturas.

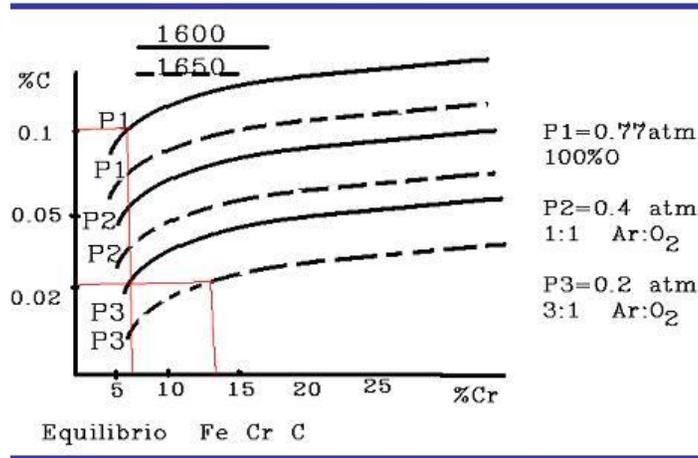


Figura 3. Gráfico de equilibrio a partir de la ecuación de Hilty muestra la relación: [C] carbón en el metal; [Cr] en el metal; temperatura del proceso y presión parcial de (CO).

Ejemplos de relaciones usando el gráfico anterior:

- Con 100% O₂ a 1650 o C; 12% Cr se Obtiene 0,1 % C
 - Con (50% O₂ + 50% Ar) 1650 o C; 12% Cr se obtiene 0,05 % C
 - Con (50% O₂ + 50% Ar) 1750 o C; 10% Cr se obtiene 0,03 % C
 - Con (25% O₂ + 75% Ar) 1750 o C; 13% Cr se obtiene 0,02 % C
- Todo esto es sin oxidarse el Cr.

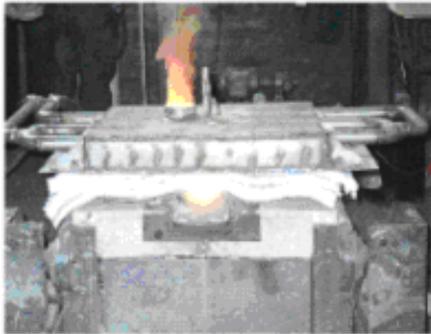


Fig 4 - Horno con tapa enfriada por agua
Manta térmica, lanza de inyección de Oxígeno

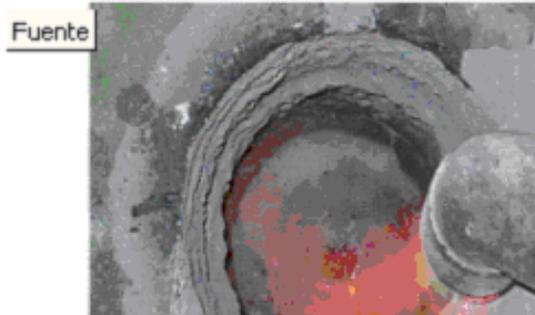


Fig 5 - Tapón precalentándose.

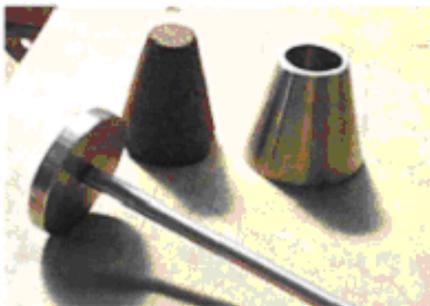


Fig 6 Tapón poroso



Fig 7 Sistema de inyección de gases
Botellones y rotámetros para la regulación del flujo de Ar-O₂-N₂.

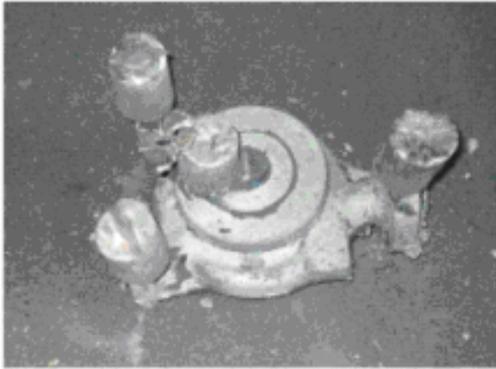


Fig 8 Pieza de bomba centrífuga fundida con la Aleación 316L.



Fig 9 Pieza de bomba centrífuga fundida con la Aleación 316L.

3. EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS ALEACIONES

Los moldes para el vertido de las muestras fueron hechos con mezclas de resina con formas cilíndricas y fundidos en posición vertical, se maquinaron tres muestras de tracción por aleación o colada, que fueron dos, la 6 y la 7 estas muestras fueron probadas en máquina Ingstrom en la Universidad Austral de Chile en Valdivia. El análisis metalográfico fue hecho en un Microscopio Electrónico SEM, del Dpto. de

Química de la misma Universidad donde se determinó el grado de inclusiones. Los resultados de propiedades mecánicas de la colada 6 y 7 se muestran en la tabla 1, se maquinaron 3 muestras de tracción, 3 muestras para metalografía y 3 muestras para SEM de cada una de las coladas.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de las coladas 6 y 7.

Test of Traction			
Heat	Sample	Rmax kg/mm ²	%A -yield
6	1	61,8	34
7	2	64,4	30,6

Estos valores se corresponden con el standard 316 L. Aleaciones obtenidas para fundición de piezas sin tratamiento térmico.

El patrón standard 316L: 0,07%C; 1%Si; 2%Mn; 18%Cr; 2,3%Mo; 11,5%Ni

En la tabla 2 se muestran las propiedades mecánicas del patrón de comparación. Recocido a 1050 oC - 1100 oC, enfriado al aire, probetas de menos de 2mm y en agua con mayores espesores. Por otra parte, en la tabla 3 se presentan las pruebas metalográficas.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del patrón de comparación.

Rmax kg/mm2	%A -yield
50 -70	40-45
Impact -Resilience	20 (kg-m)/cm2

Tabla 3. Pruebas metalográficas.

Prueba metalográfica				
Colada	Muestra	Tipo de fase	Tamaño del grano (um)	Standar tamaño (ASTM)
6	1	Austenite	25	7 asym*
7	2	Austenite	10	8 asym*

asym*: Forma asimétrica de los granos.

4. CONCLUSIONES

La composición química y las propiedades mecánicas coinciden con los Standard para

estas aleaciones fundidas en moldes, y se corresponden con los datos solicitados por las normas para las piezas correspondientes (tabla 4 y tabla 5).

Tabla 4.-Relación entre composiciones deseadas y obtenidas.

Composición Química Final	316L CF 3M Deseado Standard	Colada 6	304L CF-3 Deseado Standard	Colada 7
C	0,03	0,02	0,03	0,02
Cr	17-21	19,57	17-21	20,14
Ni	9-13	11,74	8-12	11,43
Mo	2-3	2,04	-	1,97
Si	1,5	1,67	2	1,33
Mn	1,5	1,11	1,5	0,97
P	0,04	0,016	0,04	0,014
S	0,045	0,010	0,04	0,011
Al		0,016		0,02

Tabla 5.-Relación entre propiedades deseadas y obtenidas

Propiedades mecánicas de los patrones standard teóricos					
	Rmax kg/mm2	Lim- elastic kg/mm2	%A - yield	HB	Impact-Resilience (kg-m)/cm2
316L --CF 3M	55	26,2	55	150	162,7
304L ---CF-3	53	24,8	60	140	149,2
Pruebas de tracción de las coladas experimentales					
Heat	Sample		Rmax kg/mm2	%A - yield	
6	1		61,8	34	
7	2		64,4	30,6	

Tabla 6.- Datos de los consumos de gases en las coladas experimentales

Conclusiones y observaciones colada 6	
Consumption of gases	
Oxygen	1666 liters in 36 minutes of oxidation
Average Oxygen	46,2 liters/minutes
Argon	3724 liters in 146 minutes
Average Argon	25,5 liters/minutes
Conclusiones y observaciones colada 7	
Oxygen	1368 liters in 36 minutes of oxidation
Average Oxygen	47 liters/minutes
Argon	1246 liters in 167 minutes
Average Argon	7,46 liters/minutes
Average Argon in oxidation	18 liters/minutes during 27 minutes

5. REFERENCIAS

[1] Project FONTEC and Enterprise "OMAMET", to develop new products (Stainless Steel Low Carbon) in the foundry with a new technology to introducing in the market of Chile, Santiago, Chile, 2003-2004.
[2] Parada, A. Project and Develop of installation with induction furnace (IF) to produce stainless steel low carbon. METANICA, 2006, Proceeding.
[3] Parada, A. Project and Develop of installation with induction furnace (IF) to produce stainless steel low carbon. Event

Mechanical Plant of Santa Clara, 2005, Proceeding.

[4] Angeles, M., Morales, R., Parada, A. Uso del Ferro-Cromo Alto carbono para la fabricación de Aceros resistentes al calor, Parte 2. Pruebas a nivel laboratorio. Proceeding Event in Poli-Salttillo, Coahuila, 1986.

[5] Angeles, M., Morales, R., Parada, A. Uso del Ferro-Cromo Alto carbono para la fabricación de Aceros resistentes al calor, Parte 2. Pruebas a nivel industrial. Proceeding Event in Poli-Salttillo, Coahuila, 1986

[6] Morales, R., Angeles, M., Parada, A. Desarrollo de Tecnología para la sustitución de Ferrocromo de bajo carbono de importación y níquel metálico de importación caro por Ferro-cromo alto carbono (mexicano) nacional mas barato y sinter de níquel de importación cubano para la fabricación de aceros termo resistentes y aceros inoxidable. Informe Técnico Financiero de Proyecto CONACYT – EMPRESA Aceros Tepeyac–IPN.

[7] Angeles, M., Morales, R., Parada, A. Rates during the refining of Fe-Cr-Ni-C alloys in E.A.F.(Electric Arc Furnace). The Iron and Steel Institutes of Japan, 1986.

[8] Smirnov, N. Producción de Acero en Hornos de Arco Eléctrico. Pueblo y Educación, p. 132.

[9] Hilty D.C., et al. Journal of the Iron and Steel Ins., 1955, 180, p. 116-128.

[10] Rassbach, H.P. and Saunders, E.R. Journal of Metals, aug., 1953.