



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y MECANICA

**“DESARROLLO DE LA TECNOLOGIA PARA LA
OBTENCION DEL HIERRO DUCTIL A TRAVÉS DEL
HORNO DE CUBILOTE ARTESANAL SEGÚN LOS
REQUERIMIENTOS DE LA NORMA NTE INEN 2 499:2009”**

AUTOR: MARIO ANTONIO PROAÑO GUEVARA

SANGOLQUI – ECUADOR

2014

INTRODUCCION

El presente proyecto da el procedimiento para la optimización del proceso de fusión del hierro en el horno de cubilote con el objetivo de obtener un metal fundido de buenas características para la nodulización, posteriormente este material es sometido a las exigencias de la norma ecuatoriana INEN NTE 2499:2009, siendo tales exigencias cumplidas como lo demuestran los resultados; obteniéndose un material bajo los estándares normalizados que dan como resultados un material de buenas características mecánicas, químicas y metalográficas.

INTRODUCTION

This project gives the procedure for optimizing the process of melting iron in the cupola furnace in order to obtain a molten metal of good features for pelletisation then this material is subject to the requirements of the Ecuadorian standard INEN NTE 2499: 2009, such requirements being met as evidenced by the results, I obtained a material under standard standards that give results as a material with good mechanical, chemical and metallographic properties.

1.1 FUNDICIÓN NODULAR.

El hierro colado nodular o fundición nodular se la puede definir como un hierro colado que tiene una microestructura que contiene como mínimo el 60% de partículas de grafito en forma de diminutos nódulos esferoidales en una matriz metálica dúctil. Así, este tipo de fundición tiene una resistencia mucho mayor que la fundición gris y un considerable grado de ductilidad, estas propiedades pueden mejorarse con la utilización de tratamientos térmicos adecuados.

Para desarrollar piezas de tipo nodular se utiliza entre otros elementos también como el cerio y el litio. Siendo el cerio y el magnesio los elementos más ampliamente utilizados.

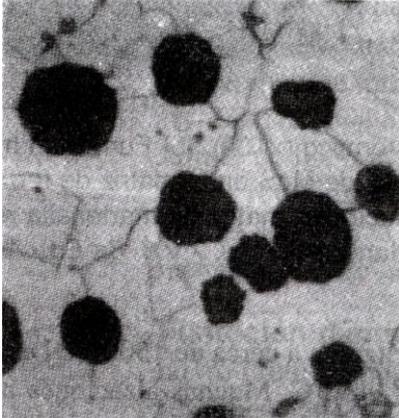


Fig. 1.1 - Fundición nodular reconocida con una matriz ferrítica (x250)¹

1.2 PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DE HIERRO NODULAR

El hierro fundido nodular se produce añadiendo magnesio al hierro gris en estado de fusión líquido, con un nivel relativamente alto de carbono equivalente; esto hace que durante la solidificación crezca grafito esferoidal.

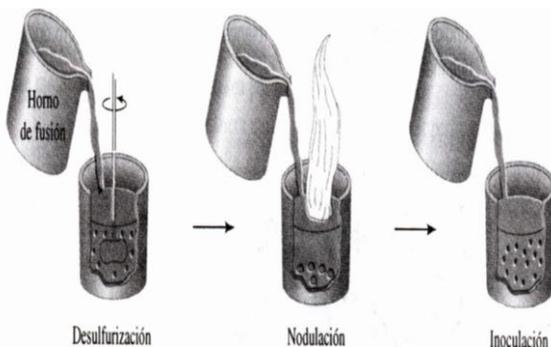


Fig.1.2 - Diagrama esquemático del tratamiento de la fundición nodular²

Primero en la Desulfuración el azufre hace que el grafito crezca en forma de hojuelas. Se obtiene hierro con bajo contenido de azufre fundiendo materiales con baja carga de azufre; también al fundir en hornos que durante la fusión eliminan el azufre del hierro o mezclando el hierro con un agente desulfurante, como el carburo de calcio.

En la nodulización se agrega magnesio para la nodulización en donde se elimina cualquier resto de azufre y oxígeno que todavía quede en el metal líquido y dejando un residual de 0.03% Mg, que causa el crecimiento de grafito esferoidal. El Magnesio se agrega aproximadamente a los 1300 °C; hay que tener en cuenta que este

elemento se vaporiza alrededor de los 1150°C. Muchas aleaciones nodulantes contienen magnesio diluido como ferrosilicio para reducir la violencia de la reacción y permitir recuperaciones más altas de Mg. La atenuación, es decir la evaporación gradual y no violenta u oxidación del magnesio, también debe ser controlada. Si no se vacía el hierro en los minutos siguientes después de la nodulación, el hierro se convierte en fundición gris. Para la Inoculación se conoce que el magnesio por sí mismo es un estabilizador eficaz de carburos, y hace que durante la solidificación se forme fundición nodular. El efecto de la inoculación también se atenúa con el tiempo. En comparación con el hierro gris, el hierro nodular tiene excelente resistencia mecánica, ductilidad y tenacidad. La ductilidad y la resistencia mecánica también son superiores a las de los hierros maleables, pero dado el mayor contenido de silicio en la fundición nodular, la tenacidad es inferior

1.3 INTRODUCCION DEL NODULIZANTE DE MAGNESIO AL HIERRO COLADO

Una de las mayores dificultades prácticas parece ser la introducción en el hierro líquido de la cantidad necesaria de magnesio con el grado de consistencia y seguridad requerido, junto con la ausencia total de peligro alguno. El magnesio hierve alrededor de los 1.150°C, y cuando se sumerge en el hierro colado líquido a 1300°C, el magnesio funde y se vaporiza instantáneamente, escapando violentamente y arrastrando consigo algo de hierro.

Para lograr un tratamiento con garantías de éxito mediante el magnesio se requiere una emulsión íntima, la liberación del magnesio tendría que durar cierto periodo de tiempo y en varios puntos del hierro líquido. Esto puede lograrse con el empleo de aleaciones de magnesio con uno o más elementos que sean solubles en el hierro.



Fig. 1.3 – Violencia de la Reacción durante la Nodulización del Hierro Colado³

2.1 FUNCIONAMIENTO DEL CUBILOTE

El cubilote, es básicamente una torre de acero, por dentro está recubierta de ladrillo refractario. En la parte de abajo, el horno está formado por el crisol o solera por el cual se sangra el hierro fundido y la escoria. Por encima de la solera se encuentra el etalaje. Es en el etalaje, el cual posee un diámetro mayor, la zona donde combustión y por ende la zona más caliente del horno.

¹ Fuente: Investigación directa Mario Proaño

² Fuente: www.monografias.com

³ Fuente: Investigación directa foto tomada en Fundiciones Palmira, Colombia elaborada por Mario Proaño

El etalaje es enfriado con agua para evitar el desgaste del revestimiento. Por lo general las toberas se encuentran espaciadas regularmente alrededor de la circunferencia de la parte baja del etalaje y estas conducen al aire soplado hacia el interior del horno bajo la zona de combustión, partiendo del ducto revestido que circunda el exterior del horno.

Comúnmente, la salida de la escoria se encuentra localizada entre 76 y 102 cm. bajo las toberas, y el orificio de la sangría se encuentra colocado ligeramente arriba del fondo del crisol.

En la parte superior del horno se encuentra la tolva de carga y las campanas de carga. La carga que se fundirá, se transporta desde el nivel del piso y elevada por medio de una banda transportadora y volcada a la tolva. Dicha carga cae al interior del horno.

El aire que es inyectado al interior del horno y es utilizado en el proceso pasa a través de un ducto alimentador y de las toberas bajo una presión de 1 a 2 kg/cm², por medio de maquinas sopladoras. De esto es que deriva el nombre de horno de soplado.

El horno básicamente está equipado de 3 o más estufas, cada una de estas tiene una cámara de combustión y un panel de ladrillo refractario. Los gases de combustión que son utilizados en fundición, poseen un poder calórico que oscila entre las 640 a 715 calorías por metro cubico y son tomadas de la parte alta del tragante y pasan por medio del ducto descendente del equipo de limpieza, donde se elimina el polvo. Los gases que están calientes suben a la parte alta de la cámara de la estufa, luego pasan hacia abajo por los ductos correspondientes.

Este aire soplado absorbe el calor de los ladrillos refractarios, y entra el aire caliente. Entretanto el aire de soplado está siendo calentado, los ladrillos refractarios se calientan por la combustión de los gases en el horno.

La carga promedio que ingresa en el alto horno es de aproximadamente 2 toneladas de hierro para fundir, mas una tonelada de carbón de coque y media tonelada de piedra caliza. Para esta carga es necesario contar con, por lo menos, cuatro toneladas y media de aire para la producción de una tonelada de arrabio. Esta cantidad de carga dada pasa por el horno en aproximadamente 9 horas continuas. El hierro fundición es sangrado y vertido cada 4 horas aproximadamente. La escoria que se obtiene, que es una mezcla de silicato de aluminio y calcio, es sangrada entre cuatro y cinco veces por cada carga.

2.2 PRINCIPIOS DE FLUIDIFICACIÓN Y CONTROL DE LA ESCORIA

Como ya se menciona, la escoria procede principalmente de la ceniza del coque, además de los productos de oxidación, del revestimiento refractario, tierra y arena en el material de carga. Esta escoria es viscosa en las temperaturas del cubilote; la necesidad de la adición de fundentes básicos proviene del propósito de bajar el punto de fusión de la escoria, aumentar la fluidez, facilidad de eliminación del cubilote y mantener el cubilote limpio para que pueda operar de manera eficiente; por el contrario, una escoria espesa e insuficientemente fluida cerrara de a poco la bóveda del cubilote, permitiendo así reducir el área efectiva, la permeabilidad de la chimenea y la superficie efectiva del coque. Lo que obtendrá como resultado de estos síntomas en contra será una temperatura

de hierro más baja, régimen de fusión retardado, menor contenido de carbono y mayor oxidación.

La escoria posee un efecto limpiador en el cubilote porque al bajar, una capa de escoria en el crisol protege al metal reunido contra los gases oxidantes de las zonas de las toberas, además aísla entra perdida de temperatura y recoge los productos de oxidación suspendidos en la paredes del cubilote que se encuentran en forma de gotas.

Los fundentes necesarios para el proceso de fundición son los siguientes:

- a) Piedra caliza CaCO₃
- b) Dolomita CaCO₃ y MgCO₃
- c) Mineral trona
- d) Estapo flúor CAF₂
- e) Carburo CaC₂
- f) Combinaciones comerciales

2.3 CUBILOTE

El horno que se utiliza en el presente trabajo es el cubilote que pertenece a la empresa Fundiciones Bonilla. Este horno tiene una capacidad de 150 Kg de fundición ferrosa. La tabla 3.9 que se muestra a continuación indica las características del cubilote utilizado.



Fig. 1.4 - Cubilote Fundiciones Bonilla⁴

CARACTERISTICAS CUBILOTE	
CAPACIDAD	150 KG DE FUNDICIÓN FERROSA (APROX)
CRISOL	DIÁMETRO 50 CM, ALTURA 300 CM (APROX) REFRACTARIO NEUTRO
TEMPERATURA MÁXIMA	1650 °C

Tabla 1.1 – Características del Cubilote Fundiciones Bonilla⁵

⁴ Fuente: Investigación propia Mario Proaño fotografía tomada en Fundiciones Bonilla – Ibarra, Ecuador

⁵ Fuente: Investigación propia Mario Proaño

2.4 REACCIONES QUIMICAS DURANTE LA COMBUSTION

Las siguientes reacciones químicas se presentan entre el combustible y los constituyentes reactivos presentes en la atmosfera gaseosa del interior del cubilote.

- I. $C_{(COQUE)} + O_2 = CO_2$
 Desprendimiento de calor a 25°C = +9700
 Kcal/kg mol – Encendido del cubilote
- II. $C_{(COQUE)} + O_2 = 2CO$
 Desprendimiento de calor a 25°C = -40500
 Kcal/kg mol – Desarrollo de la combustión

En las reacciones I y II son las productoras de calor del proceso de función, aun a las mismas temperaturas que ocurren dentro del cubilote. El proceso debe enfocarse hacia la generación CO_2 , ya que se trata de una reacción exotérmica que libera calor hacia el ambiente.

2.5 ZONAS DEL CUBILOTE

Se trata de las zonas de combustión, zona de oxidación de la carga, zona de reducción, zona de precalentamiento como se observa en el siguiente grafico.

- **Zona de oxidación o de combustión**

Es la zona de reacción del oxígeno con el combustible (coque), a la vez que es la región de máxima temperatura normalmente entre 1500 – 1800 °C.

- **Zona de reducción de la carga**

Aquí el carbón se quema y reduce de tamaño, es la zona donde el material se funde, la temperatura alcanza los 1450°C.

- **Zona de fusión**

Es aquí donde se produce el cambio de fase del metal de solido a liquido, la tasa de absorción promedio para el hierro gris es de 23 Kcal/kg y de 160 Kcal/kg para la chatarra de acero.

- **Zona de precalentamiento**

En esta sección del cubilote los gases calientes que suben a través de la zona de fusión calentando el metal y la caliza, donde se tiene una temperatura que varía entre 650 – 870°C.

Además ocurren otras reacciones como la absorción del azufre por parte del metal que luego es limpiado mediante el carbonato de calcio (caliza) para formar la escoria.

- **Precalentamiento del aire soplado**

El precalentamiento del aire soplado aumenta la temperatura de la zona de oxidación en proporción directa al calor sensible abastecido por el aire. El aire que ingresa a las toberas y circula alrededor hasta ingresar al cubilote, al contacto con la pared del cubilote hace que este aire se precaliente hasta los 400°C.

El aire precalentado mejora la combustión, ahorra combustible y evita el empastamiento del hierro.

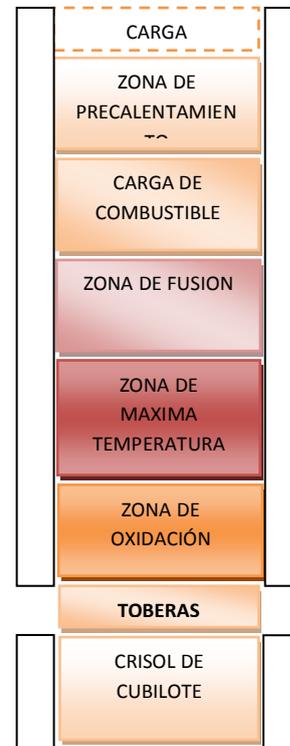
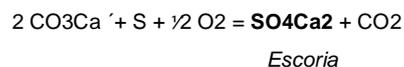


Fig. 1.5 – Zonas del Cubilote⁶

2.5 PROCESO DE FUSION EN EL CUBILOTE

Para la operación del cubilote se cargan metales y combustibles en proporciones predeterminadas; a continuación se describen los pasos que se efectúan:

- Precalentamiento del material con los gases ascendentes de las reacciones de oxidación.
- En la zona de fusión ocurre el cambio de fase de solido a liquido del metal que al pasar por la zona de oxidación alcanza la mínima temperatura y el hierro fundido gotea sobre combustible incandescente.
- En la zona de precalentamiento además ocurre otro cambio de fase del fundente carbonato de calcio o la caliza que pasa de solido a liquido dando origen a la formación de la escoria.

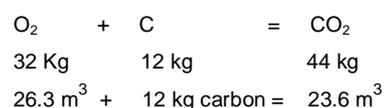


2.6 CALCULO DEL REQUERIMIENTO DEL AIRE

El peso del aire suministrado al cubilote debe ser igual al peso del metal cargado, proporcional a las cargas de combustible, fundente y metal. Para una combustión perfecta en condiciones normales de presión y temperatura, las relaciones estequiométricas son:

Presión atmosférica = 760 mmHg

Temperatura ambiental = 15.6°C



⁶ Fuente: Investigación propia Mario Proaño

Aire contiene 21% oxígeno, así que se necesitan:

$$\frac{26.3}{0.21} = 125.23m^3$$

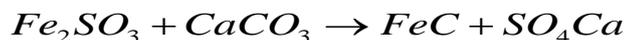
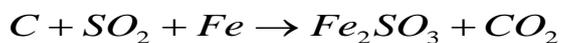
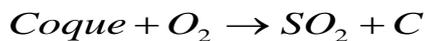
En la práctica se debe calcular un 20% más de aire debido a las pérdidas de operación.

$$\text{Requerimiento Aire} = \frac{125.23m^3 \text{ Aire}}{12 \text{ Kg Carbon}} = 10.43 \cdot 120\%$$

$$\text{Requerimiento Aire} = 12.52 \frac{m^3 \text{ Aire}}{\text{Kg Carbon}}$$

2.7 INFLUENCIA DEL AZUFRE DURANTE LA FUSION DEL METAL

La absorción del azufre es esencialmente un fenómeno de superficie que se origina principalmente en la zona de precalentamiento, esta favorecido por las bajas temperaturas, este pierde azufre en la medida que desciende la carga hacia la zona de fundición y reacciona con el fundente de la siguiente manera:



Es importante la eliminación máxima del azufre durante la fusión debido a que la combinación del azufre con el hierro fundido le perjudica en las propiedades mecánicas (fragilidad) y su soldabilidad.

2.8 CONTROL DE LA COMBUSTION

El calor requerido para precalentar, fundir y sobrecalentar el metal es suministrado por la combustión del coque, parte de este calor se pierde como resultado de la reducción del dióxido del carbono (CO₂) a monóxido de carbono (CO) en la zona de reducción, cuanto mas bajo sea el porcentaje de dióxido de carbono convertido, mayor será la calidad del calor disponibles por consiguiente, una combustión eficiente se traduce en mas hierro fundido por kilogramo de combustible.

$$1 \text{ Kg Carbon} = 5.77 \text{ Kg Hierro Fundido}$$

La relación de 6 a 1 hierro carbono se cumple para esta formulación. Y no hay que olvidar que 1 Kg de Aire equivale a 13.34 m³ en peso de volumen.

2.9 DESULFURACION

El azufre ocasiona el crecimiento del grafito en forma de hojuelas en vez de forma esférica, para obtener un hierro con bajo contenido de azufre es necesario utilizar una materia prima de alta calidad como es el arrabio, o mezclando el hierro líquido obtenido con un agente desulfurante, como:

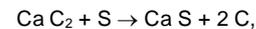
- Carburo de calcio (CaC₂)
- Sosa (Na₂CO₃)
- Carbonato de Calcio (CaCO₃)
- Cal viva (CaO)
- Sosa cáustica (NaOH)

El desulfurante utilizado es el CaC₂ (carburo de calcio) ya que es el más adecuado para nuestro medio. En teoría para remover 0.1% de

azufre se necesita 0.2% de carburo de calcio (CaC₂), sin embargo parte de la reacción del CaC₂ formará CaO en vez de CaS y otra parte se pierde por la reacción en sí. Por lo que se debería utilizar de 5 a 10 veces la cantidad teórica.

Se realiza el cálculo para 100 Kg de hierro a tratar con un contenido de 0.42% de S para asegurar una efectiva desulfuración.

Al asumir inicialmente un contenido de 0.42 % de azufre en la chatarra, en los 100 Kg de metal líquido se tienen 0.42 Kg de azufre. Cantidad de Desulfurante se tiene la reacción:



Es decir que 0.42 Kg de CaC₂ removerán 0.42 Kg de azufre. Debido a que parte del CaC₂ puede formar CaO (que pasa constituir escoria) en vez de CaS, se necesita por lo menos el doble de la cantidad teórica de CaC₂.

Por lo tanto, la cantidad teórica necesaria para realizar la desulfuración de 100 Kg de metal líquido con un contenido de 0.42% de azufre es 0.84 Kg de CaC₂.

El carburo de calcio disponible comercialmente ya ha reaccionado con el vapor de agua del ambiente, por esta razón se utiliza 1 Kg con lo cual se espera que entre en reacción por lo menos 0.84 Kg de CaC₂. El hierro desulfurado pasa a tener como máximo 0.02% de azufre (S).

2.10 NODULIZACION

En la práctica para obtener el grafito esferoidal, es necesario, además, de añadir magnesio en la forma y la cantidad conveniente adicionar también un elemento inoculante a la fundición. El magnesio, que en este proceso se considera como el agente que promueve la esferoidización, en realidad si fuera el único elemento que se adicionara al baño daría lugar a la formación de una fundición blanca. Siendo el magnesio un elemento que blanquea la fundición, se comprende que la acción combinada con la de un inoculante es la que produce la esferoidización.

No conviene añadir el magnesio en forma metálica, al baño de fundición, porque da lugar a una reacción violenta con desprendimiento de humos, proyecciones de metal y pérdida importante de magnesio. Normalmente el magnesio se añade en forma de aleaciones níquel-magnesio con 15% de magnesio aproximadamente, y a veces cobre-magnesio con 15 a 25% de magnesio. En ocasiones, también se emplean aleaciones cuaternarias hierro-silicio-cobre-magnesio, o hierro-silicio-níquel-magnesio. Empleando estas dos últimas aleaciones no suele ser necesario la adición posterior de ferrosilicio u otro inoculante.

La cantidad requerida de Mg en un tratamiento de nodulización es la suma del Mg consumido por el azufre más la cantidad de Mg residual en el metal base luego del tratamiento.

La composición química de la aleación (Fe-Mg) que se utilizó para la nodulización es:

$$\text{Mg} = 13-16\%$$

$$\text{Si} = 26-33\%$$

$$\text{Fe} = 5\% \text{ max}$$

- **Ejemplo: para tratar 30 Kg de metal:**

- **Cantidad de Mg consumida por el azufre**

$$(C_1): C_1 = \frac{3}{4}(S_{metal})$$

S_{metal} es la cantidad del azufre en el metal, 0.02%

$$C_1 = \frac{3}{4} \left(\frac{0.02}{100} \times 30 \right) = 0.0045 Kg = 4.5 gr.$$

- **Cantidad de Mg en el metal a tratar (C_2):**

El Mg residual en el metal base puede ser 0.03%

$$C_2 = \frac{0.03}{100} \times 30 = 0.009 Kg = 9 gr$$

- **Cantidad requerida de Mg (C_{req})**

$$C_{req} = C_1 + C_2 = 4.5 + 9 = 13.5 gr$$

Esta cantidad de Mg es la suficiente y necesaria para el tratamiento de nodulización. Dependiendo de la técnica y de la temperatura de tratamiento se tiene una recuperación de Mg(Rec) en el tratamiento. Supongamos que se tiene una recuperación del 40%. La cantidad de Mg a introducir en el baño (C_{real}), lógicamente, será mayor a la cantidad requerida de Mg (C_{req}).

Supongamos que Rec = 40%

$$C_{real} = \left(\frac{C_{req}}{\frac{\% Rec}{100}} \right)$$

$$C_{real} = \left(\frac{13.5}{\frac{40}{100}} \right) = 33.75 gr$$

La cantidad de aleación ($C_{aleación}$) a añadir depende de la composición con respecto al Mg.

$$C_{aleación} = C_{real} \times \left(\frac{100}{\% Mg_{aleación}} \right)$$

Supóngase ahora que el % Mg en la aleación ($\% Mg_{aleación}$) es 10%

$$C_{aleación} = 33.75 \times \left(\frac{100}{10} \right) = 337.5 gr$$

2.10 INOCULACION

Es preciso realizar el tratamiento de inoculación para conseguir sitios de nucleación del hierro, y se lo realiza por medio de aleaciones de ferrosilicio que contienen entre 50 y 85% de silicio.

Debido a que la nodulización provoca la formación de hierro blanco durante la solidificación, por la presencia del magnesio que es un estabilizador muy eficaz de carburo.

La cantidad de Si a añadir es la diferencia entre el contenido de Si en el metal antes del tratamiento y el contenido de Si luego del tratamiento:

Se tiene que:

- Hierro antes de inoculación: %Si = 1.13%
- Hierro luego de inoculación: %Si = 1.95%
- Cantidad de hierro a inocular: 30Kg.

Contenido de Si en aleación inoculante: 75%

$$Hierro antes de inoculación = 30 kg \times \left(\frac{1.13}{100} \right) = 0.339 Kg$$

$$Hierro luego de inoculación = 30 kg \times \left(\frac{1.95}{100} \right) = 0.585 Kg$$

Cantidad de Si a añadir = 0.585 - 0.339 = 0.246 Kg

$$Cant. aleación_inoculante\ a\ a\~{n}adir = 0.246 kg_{Si} \times \left(\frac{100 kg_{aleación}}{75 Kg_{Si}} \right) = 0.328 Kg$$

Nota: se supone una recuperación del 100% en el tratamiento de inoculación.

3. ANALISIS DE RESULTADOS

3.1 ANALISIS DE LA FUNDICION NODULAR OBTENIDA MEDIANTE CUBILOTE

Los resultados obtenidos en la fundición provienen básicamente al control metalúrgico, variaciones de la cantidad de aleación nodulizante, la cantidad de inoculante y la temperatura de tratamiento. Las variaciones de estos factores permiten lograr el objetivo de este trabajo que es el de obtener hierro nodular normalizado según NTE INEN 2499:2009 que sirve como materia prima para la fabricación del tambor de freno. Los resultados obtenidos se refieren a una observación metalografía, ensayos de tracción y de dureza sobre cada una de las pruebas realizadas.

Con los ensayos de tracción y de dureza se observan los diferentes comportamientos que presentan los hierros logrados en cada prueba. La curva Esfuerzo-Deformación se la realiza midiendo los distintos valores de deformación para cada carga. En la observación metalográfica se determinan las variaciones que tiene la forma de grafito y se cuantifican las mismas. Para determinar la cantidad y forma aproximada del tipo de hierro, se realizan observaciones metalográficas a 100X sobre la probeta de cada prueba, después se cuenta la cantidad existente de grafito en forma de flóculos y esferoides. Esto permite tener un porcentaje aproximado de la forma de grafito que predomina, se determina también el tipo de matriz; los resultados que se obtienen se presentan en la tabla 5.3

- Resultados Obtenidos de los diferentes ensayos en la fundición nodular.

Tabla 1.2 – Resultados de probetas que cumplieron requerimientos⁷

Probeta	Resistencia a la Tensión	Rango Nodularidad	Rango Perlita	Rango Ferrita	Rango Carbono	Conteo Nódulos	Observ.
	PSI	%	%	%	%	u/mm ²	
1	75993,1	90	27	63	4	25	Matriz ferrítica-perlítica
2	69705,0	90	27	63	4	25	Matriz ferrítica-perlítica

Las probetas de las fundiciones 1 y 2 demostraron sobrepasar el límite mínimo establecido por la norma NTE INEN 2499:2009, el cual solicita sea un mínimo de 40000 PSI de esfuerzo a la tracción y un alargamiento promedio del 12% aproximadamente.

Además el grado de nodularidad que se obtuvo según la tabla de rango de microestructura de hierros dúctiles AFS, otorga el 90% de nodularidad al notar la carencia de hojuelas de grafito bajo el microscopio.

El alargamiento medido después del ensayo de tracción dio como resultado un valor de 11.9% en relación a las medidas originales de la probeta.

3.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON LA NORMA NTE INEN 2 499:2009.

Teniendo la relación de 1 MPa = 145.0377 PSI, se deduce mediante cálculo que las probetas según los resultados en los ensayos de tracción dieron los siguientes resultados:

Tabla 1.3 – Resultados obtenidos en los ensayos de tracción⁸

A	Re	Rm	Re	Rm	A
Probeta	(PSI)	(PSI)	(MPa)	(MPa)	(%)
1	75993,10	86664,80	523,95	597,53	11,9
2	69705,00	81257,10	480,60	560,25	10,5

- De donde:

Re = Esfuerzo en la fluencia

Rm= Esfuerzo en la rotura

A = Alargamiento porcentual en 50 mm

El esfuerzo Re que representa según la tabla 5.4 tipos de fundición nodular, sitúa a nuestra mejor fundición (probeta 1) con un valor de 523.95 Mpa entre los grados 80-55-06 y 100-70-03. Además el esfuerzo Rm que no es otra cosa que la resistencia mínima a la tracción igualmente para la mejor fundición (probeta 1) nos otorga

un valor 597.53 MPa igualmente situándola entre los tipos 80-55-06 y 100-70-03; teniendo en cuenta que el grado de nodularidad según la tabla AFS otorga el grado de nodularidad de 90%.

Cabe tomar en cuenta que el alargamiento porcentual fue de 11.9% lo que mejora aun más las características del metal obtenido durante este proyecto.

Para ubicar a nuestro producto tomando en cuenta las aseveraciones enunciadas ubicamos a nuestro material en el grado 100-70-03, pero con la excepción del alargamiento porcentual que no es del 3% sino cercano al 12% lo que demuestra tener una fundición de alta resistencia y ductilidad.

El maquinado según se realizo para el tambor de freno como para la elaboración de las probetas demostró ser fácil y de dureza moderada, eso sí tuvo una mayor dureza comparada con las piezas de fundiciones grises.

Si analiza con las diferentes tablas se podrá aseverar que nuestra fundición podría reemplazar a piezas que son fabricadas en acero suave que no supere su límite de fluencia en 500 MPa.

3.3 ANALISIS METALOGRAFICO

De la metalografía que se observa en la siguiente grafica se puede deducir lo siguiente:

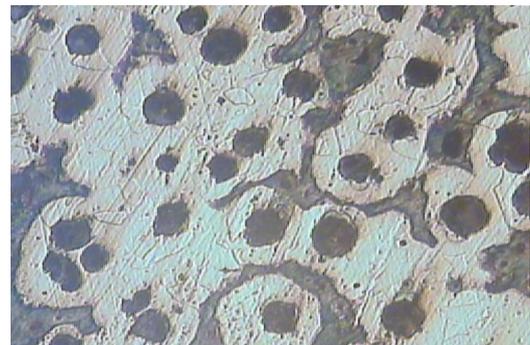


Fig. 1.6 – Microestructura de la fundición observada mediante microscopio ataca químico 100x⁹

La presencia mayoritaria de ferrita alrededor del nódulo de grafito lo que evidencia una buena calidad en la fundición, además la presencia de perlita en baja cantidades separando los granos de la matriz ferrita perlítica.

Se observa un tamaño uniforme de nódulo de grafito lo que evidencia una homogeneidad en la composición del material. Además en los límites de grano se divisa una baja presencia o casi nula en algunos granos de elementos nocivos a la resistencia y ductilidad del material como son la presencia de sulfuros y fosfatos.

⁷ Fuente: Resultados obtenidos por investigación propia

⁸ Fuente: Resultados obtenidos por investigación propia

⁹ Fuente: Investigación propia Mario Proaño



Fig. 1.7 – Microestructura de la fundición observada mediante microscopio 400x¹⁰

La ferrita presente mayoritariamente y sin la presencia de poros o cámaras de aire entre el material garantizan las buenas cualidades que presentó el material durante los diferentes ensayos.



Fig. 1.8 – Microscopio para verificación de metalografía¹¹

4. CONCLUSIONES

En el presente proyecto se cumplió el objetivo de obtener una fundición nodular resistente y dúctil, además con un alto grado de modelización utilizando como medio para fusión del metal hierro y chatarra el horno de cubilote, el cual presenta varias características peculiares que hicieron de este proyecto un verdadero reto, que fue cumplido y del cual se desprenden las siguientes conclusiones:

- Para la obtención de un adecuado metal fundido que sirva de base para la nodulización se debe hacer un riguroso análisis de las condiciones físicas de operación del cubilote como son las dimensiones de acuerdo a la capacidad esperada de producción, la alimentación de aire soplado mediante un análisis de rendimientos, la calidad del coque requerido, el manejo adecuado de las cargas para la operación del cubilote según un balance de masa, conocer en qué consisten las diferentes zonas de trabajo y como operan dentro del cubilote, la temperatura de operación y el adecuado uso de los fundentes.
- Se debe controlar la formación de escoria ya que una buena fluidez de las mismas será señal de un buen metal fundido, esto se debe a que hay que eliminar la mayor

cantidad de azufre posible debido a que este elemento en combinación con el hierro resulta en sulfuro de hierro el cual al no ser muy adherente se ubica en los límites de grano y limita la resistencia a la tracción del material.

- Para eliminar la mayor cantidad de azufre se debe verificar la alimentación de aire soplado dentro del cubilote según las tablas de rendimiento del cubilote.
- Realizar un balance de carga y trabajar en una relación de hierro – coque ayuda siempre a tener un material limpio de azufre y una escoria fluida que ayuda a tener un metal en excelentes condiciones.
- Utilizar el carburo de calcio además de ser un excelente fundente al igual que la caliza, proporcional un aumento a la temperatura de fusión en la zona de oxidación considerable, el cual permite levantar el hierro fundido hasta temperaturas cercanas a los 1450°C.
- Debido a que en nuestro medio no tenemos las herramientas adecuadas para realizar un excelente control metalúrgico base para cualquier buena fundición, nos obligamos a realizar un cálculo promedio de los elementos que forman la materia prima y los combustibles para el proceso de fusión en el cubilote, los que resultaron positivos y ayudaron de mejor manera la obtención de un buen hierro fundido.
- La inoculación se la realizó antes de la nodulización al cargar directamente la rocas de ferrosilicio al cubilote, acción que no afectó en nada la obtención del grafito nodular.
- Al obtener un material óptimo, se procedió a realizar la nodulización en la cuchara de carga según los valores calculados para cantidad de nodulizante, este paso fue controlado y desarrollado con todas las seguridades para proceder luego al colado del metal líquido en el molde.
- El tambor obtenido mediante fundición nodular no presenta porosidades grades sino permisibles lo que demuestran un producto de buena calidad.
- La buena resistencia a la tracción del material se acerca a la resistencia del acero de baja aleación por lo que podría ser un buen reemplazante para ciertas piezas de la industria automotriz nacional.
- Se observó en la metalografía un grado de nodularidad del 90% con la presencia de ferrita 63% y perlita 27%, sin presencia de hojuelas de grafito laminar, con lo que se cumplió el objetivo planteado en el proyecto.
- Se cumplieron los requerimientos del hierro nodular bajo los requerimientos de la norma ecuatoriana NTE INEN 2499:2009 otorgándole el grado a nuestra fundición de 100-70-03 pero con la diferencia de una deformación cercana al 12%.
- Con el análisis económico financiero se determinó que el costo por kilogramo de fundición nodular tiene un precio de 7.31 USD con una utilidad del 300%, con lo que su precio puede competir con los precios de las piezas hechas en acero (8 usd por kilogramo), que serían equivalentes en resistencia, pero con la diferencia que el

hierro nodular no se oxida y deteriora como el acero con el transcurso del tiempo.

- El control metalúrgico es esencial para la obtención de una fundición de características que cumplan con las normas requeridas.

5. RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar esta clase de material en la elaboración de piezas que estén sometidas al desgaste debido a que el hierro nodular al poseer características de resistencia y ductilidad altas permite un mejor desempeño para piezas sometidas a fricción.
- Se recomienda para el manejo de la fusión en el cubilote hacer un análisis de las condiciones y parámetros que están gobernando el proceso, para realizar los ajustes necesarios en caso de tener bajos rendimientos de metal fundido.
- Siempre trabajar con un coque seco y limpio para evitar formar escorias muy duras que impidan la normal fusión dentro del cubilote.
- Manejar el ingreso de cargas de acuerdo a un plan, no hacerlo solo por experiencia porque se perjudicaría el proceso en su rendimiento.
- Entender que el ingreso del aire y un adecuado manejo de las cargas permitirá desulfurar al metal líquido dentro del cubilote para así obtener un metal de buenas características.
- Se recomienda siempre trabajar bajo estándares de calidad, porque esto permitirá incrementar el precio de nuestro producto al igual que la confiabilidad de nuestros clientes.
- Se recomienda no detener la investigación de estos procesos dentro de nuestro país porque la industria de la metalurgia es base para la economía de varios países en el extranjero y nuestro objetivo como ecuatorianos es crear proyectos que impulsen y saquen adelante al Ecuador.

BIBLIOGRAFÍA

- Arrejin, D. (2012). *Metalografía*. Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos67/metalografia/metalografia2.shtml>
- Capello, E. (1966). *Tecnología de la fundición*. Mexico: Ed. Gustavo Gili S.A.
- *Edad de los Metales*. (s.f.). Obtenido de Wikipedia: http://es.wikipedia.org/wiki/Edad_de_los_Metales
- INEN. (2009). Norma Ecuatoriana NTE INEN 2499:2009. Quito, Ecuador.
- Linebarger, F. (s.f.). *THE DUCTILE IRON*. Obtenido de <http://www.ductile.org/>
- Nacional, E. P. (1979). Seminario de Fundición Nodular. Quito - Ecuador.

- Nacional, E. P. (2012). Fundición . *Seminario de Fundición en Horno Eléctrico* . Quito - Ecuador.