

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

DESULFURACIÓN DEL HIERRO GRIS
CON EL USO DE SOBRE REPELLO CALIZO
EN EL CRISOL DE HORNO DE CUBILOTE

CRD

Holguín

Curso 2015-2016



UHo UNIVERSIDAD
DE HOLGUÍN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

DESULFURACIÓN DEL HIERRO GRIS
CON EL USO DE SOBRE REPELLO CALIZO
EN EL CRISOL DE HORNO DE CUBILOTE

Autor: JOSÉ ANTONIO LÓPEZ GONZÁLEZ

Tutores: MSc. RIGOBERTO PASTOR SÁNCHEZ FIGUEREDO

Dra. C. ANA MARIA QUESADA ESTRADA

CRD

Holguín

Curso 2015-2016



UHo UNIVERSIDAD
DE HOLGUÍN

AGRADECIMIENTOS

A toda mi familia que siempre me ha apoyado y me ha alentado para que siga adelante, a todos los profesores que me transmitieron sus conocimientos y que formaron parte de mi formación en especial a mis tutores: el Msc. Rigoberto Pastor Sánchez Figueredo y la Dra. C. Ana Maria Quesada Estrada.

DEDICATORIA

A mi familia en especial a mis padres que han luchado siempre para llegar a ser ingeniero.

RESUMEN

Esta investigación versa sobre el estudio de los métodos de desulfuración, su aplicación en la industria mecánica, específicamente en el taller de fundición de ferroso y no ferroso de la UEB “Héroes del 26 de Julio”, perteneciente a la Empresa Mecánica de Holguín, donde presentan problemas con la desulfuración del hierro con grafito esferoidal. Para dar solución a este problema se realizó una revisión bibliográfica actualizada se emplearon métodos de investigación científica y se elaboró una nueva tecnología para la desulfuración del hierro gris por el método de sobre repello calizo. Se logró elaborar una tecnología para la desulfuración del hierro gris por el método de sobre repello calizo, en la obtención del hierro con grafito esferoidal por el tratamiento (in mold), aplicando el método de “Vertido Vibratorio”. La tecnología propuesta demuestra la factibilidad de la utilización del método de sobre repello calizo en la desulfuración del caldo metálico que ha de ser modificado en hierro con grafito esferoidal en lugar del resto de los métodos empleados.

ABSTRACT

This research deals with the study of methods of desulfurization, its application in mechanical industry, specifically in the foundry of ferrous and nonferrous the UEB "Heroes del 26 de Julio", belonging to the Mechanical Company of Holguin, where they have problems with desulphurization spheroidal graphite iron. To solve this problem an updated literature review was used, as well as methods of scientific research and new technology for desulfurization of gray iron. It was also possible to develop a technology for desulfurization of gray iron by the method of on chalky plaster, obtaining spheroidal graphite iron by treatment (in mold), applying the method of "Vibratory Discharge". The proposed technology demonstrates the feasibility of using the method on chalky plaster in the desulfurization of molten metal that must be used in spheroidal graphite iron instead of other methods.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DE LA PRODUCCIÓN DE HIERRO GRIS EN HORNOS DE CUBILOTE Y LOS MÉTODOS DE DESULFURACIÓN EN LA OBTENCIÓN DE HIERRO CON GRAFITO ESFEROIDAL. | 9 |
| 1.1 Hornos de cubilote | 9 |
| 1.2. Influencia del azufre en la obtención del hierro con grafito esférico..... | 15 |
| •Contenido de azufre del metal base. | 15 |
| 1.3 Desulfuración | 24 |
| Métodos de desulfuración. | 27 |
| Método de desulfuración en cazuela para llevar el contenido de azufre a los límites establecidos para la producción de hierro nodular mediante el (in mold)..... | 27 |
| •Desulfuración intermitente | 28 |
| •Desulfuración continua | 29 |
| CAPÍTULO 2 TECNOLOGÍA DE DESULFURACIÓN CON SOBREPHELLO CALIZO EN HORNO DE CUBILOTE. | 37 |
| 2.1. Investigación de la factibilidad física de la caliza triturada, como material base de la mezcla, para el sobre repello calizo | 37 |
| Análisis experimental para determinar: el espesor del sobre repello | 38 |
| 2.2 Tecnología alternativa de preparación para la colada del horno de cubilote HC – 720 mm, bajo las condiciones específicas de la UEB “Héroes del 26 de Julio” Holguín..... | 42 |

| | |
|--|----|
| 2.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 46 |
| Valoración económica..... | 46 |
| Valoración medioambiental..... | 48 |
| Valoración del aporte para la defensa..... | 48 |
| CONCLUSIONES..... | 49 |
| RECOMENDACIONES..... | 51 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 52 |

INTRODUCCIÓN

Las aleaciones ferrosas constituyen una amplia gama de materiales que se pueden clasificar ya sea por su estructura, como por su composición química. Una de las más difundidas, tanto por su uso como por su factibilidad económica, son las llamadas fundiciones. Estas no son más que aleaciones hierro-carbono con un porcentaje de carbono por encima del 2,13%, además de otros elementos que son constantes y considerados impurezas cuando no se utilizan con el fin de darles características específicas a las mismas.

Las fundiciones, por su composición química, se clasifican en fundiciones grises y fundiciones aleadas, atendiendo a la forma del grafito mediante un microscopio metalográfico se observan tres formas diferentes. La fundición gris “ordinaria” tiene el grafito en forma de pequeñas vetas o hojuelas, conocida también como grafito laminar; lo cual hace que esta fundición se fracture con facilidad en presencia de un impacto debido a los concentradores de tensiones. La fundición gris con grafito nodular se obtiene a través de recocido. Luego de aplicado el recocido el grafito adopta una forma compacta, casi equiaxial, pero no redonda. Ese grafito se llama nodular o de recocido. En la práctica a la fundición nodular se le llama fundición “maleable”. La tercera forma de ver el grafito es la forma esferoidal. En la actualidad para obtener grafito esferoidal se le añade a la fundición una aleación que contiene magnesio, la cual hace posible que el grafito adopte una forma de esfera. [2, 23, 34,36]

Sobre el estudio de los métodos de desulfuración, su aplicación en la industria mecánica, en la obtención de hierro con grafito esferoidal, versa esta investigación.

En el taller de Fundición de ferroso y no ferroso de la UEB “Héroes del 26 de Julio” perteneciente a la Empresa Mecánica de Holguín”, está ubicada en la carretera de San Germán Km. 3 ½, Holguín, fue fundada en julio de 1980 y redimensionada en el año 2003 y está consta con dos talleres fundamentales para su producción.

El taller primario de fundiciones ferrosas, posee una capacidad de producción calculada, de 360 toneladas al año. Se producen piezas principalmente para la Industria Mecánica, ministerio de energía y minas (MINEM), ministerio del turismo (MINTUR), ministerio de la industria (MINDUS), ministerio de las fuerzas armadas revolucionaria (MINFAR), ministerio del interior (MININT), Grupo Empresarial AzCuba entre otras. El moldeo se realiza generalmente en dos tipos de cajas metálicas, de dimensiones (1000 x 800 x 300) mm y (630 x 500 x 250) mm y se utilizan mezclas en verde. En la actualidad, la carga para la producción del hierro fundido gris presenta la siguiente composición: 70 % de chatarra de hierro y 30 % de retorno.

En este taller de fundiciones ferrosas, se encuentra ubicado un horno de cubilote de cuba alta discontinuo, de 720mm de diámetro interior, con una capacidad de sangrado de 1 000 kg de caldo de hierro gris, que erosiona las paredes interiores del horno y esto provoca que en los trabajos de preparación para la colada se tenga que realizar reparaciones parciales al interior del horno con arenas y morteros refractarios.

Posee un taller secundario, para la elaboración y secado de los machos, estos son elaborados con mezclas de cromita, bentonita, (*fuel oil*) y melaza con secados en estufas a temperaturas de (200 – 250) °C. Presenta un sistema de moldeo mecanizado con máquinas neumáticas movidas por un compresor que impulsa de forma estable, aire comprimido a seis atmósferas.

El taller de fundiciones no ferrosas en su entorno tecnológico también cuenta con diferentes hornos como son:

- Horno de crisol para la fusión de bronces.
- Horno Wilkinson para la fusión de cuproaleaciones.
- Horno tambor para la fusión de aleaciones de aluminio y se moldea con pisones neumáticos y mezclas en verde.

Además, la empresa tiene un taller auxiliar de herramental, para la construcción de los modelos, accesorios, dispositivos y mantenimiento necesario para la ejecución de la producción.

En la actualidad, la carga para la producción del hierro fundido gris presenta la siguiente composición: chatarra de hierro 20%, chatarra de acero 20% y retorno 60%. El contenido de azufre en el metal base, a partir del año 1998 ha aumentado de 0,03% hasta 0,067% según datos del 2001. Inmediatamente después de sangrado el metal del horno de cubilote comienza a perder temperatura por eso para lograr verter con la temperatura tecnológica de modificación y obtener hierro con grafito esferoidal la desulfuración debe realizarse en el menor periodo de tiempo posible. [3, 4 ,9]

Por lo anteriormente dicho se define el siguiente **problema científico** la desulfuración del hierro gris obtenido en horno de cubilote de la unidad empresarial de base (UEB) “Héroes del 26 de Julio” perteneciente a la Empresa Mecánica de Holguín

Se plantea como **objeto de estudio**: los métodos de desulfuración del hierro gris

Como **campo de acción** se plantea: desulfuración del hierro gris en horno de cubilote.

La investigación plantea como **hipótesis** que: si se aplica el método de desulfuración con sobre repello calizo sobre la base de una adecuada relación entre el espesor del sobre repello y el por ciento de azufre, se logrará obtener un por ciento de azufre adecuado que permita la obtención de hierro gris modificado en el molde con el uso del vertido vibratorio para la obtención de hierro con grafito esferoidal.

Se plantea como **objetivo general**: Elaborar una tecnología para la desulfuración del hierro gris por el método de sobre repello calizo, en la obtención del hierro con grafito esferoidal por el tratamiento (*in mold*), aplicando el método de “Vertido Vibratorio”.

Como **tareas de la investigación** se plantean:

1. Realizar una revisión bibliográfica actualizada de los métodos de desulfuración del hierro gris y de la desulfuración del hierro gris en horno de cubilote.
2. Evaluar los procedimientos existentes y los métodos de desulfuración que intervienen en la obtención de hierro con grafito esferoidal por el tratamiento (*in mold*) a nivel internacional, a fin de construir el marco teórico referencial necesario que caracterice el objeto de estudio de la investigación.
3. Realizar ensayos para aplicar el nuevo método.
4. Procesar la información.
5. Elaborar el informe final.

Métodos de investigación utilizados.

Los métodos científicos cumplen una función fundamental en el desarrollo de la ciencia, ya que permiten obtener nuevos conocimientos sobre el fenómeno que se estudia y ejercen un papel importante en la construcción y desarrollo de la teoría científica.

Métodos teóricos:

- **Método histórico-lógico:** Este se aplica para establecer el estado del arte del tema de investigación, como marco teórico referencial, permitiendo conocer que se ha investigado sobre el tema objeto de estudio y que leyes o aspectos generales se abordan en el fenómeno que se estudia.
- **Método de inducción-deducción:** A partir del estudio de diferentes casos particulares se llega a establecer aspectos que son generales y leyes empíricas, que constituyen puntos de partida para inferir o confirmar formulaciones teóricas, de las cuales se deducen nuevas conclusiones lógicas que son sometidas a prueba de acuerdo con las generalizaciones empíricas. Se aplicará para la evaluación de los diferentes criterios que intervienen en la tecnología para la desulfuración del hierro gris por el método de sobre repello calizo, en la obtención del hierro con grafito esferoidal por el tratamiento (*in mold*) y el uso del método de "Vertido Vibratorio".
- **Método computacional:** Se utiliza durante la concepción y desarrollo de la aplicación informática para asistir en el cálculo de los parámetros que intervienen en la tecnología para la desulfuración del hierro gris por el método de sobre repello calizo, en la obtención del hierro gris grafito esferoidal por el tratamiento (*in mold*) y el uso del método de "Vertido Vibratorio".

Métodos empíricos:

- **Método de la observación científica:** consiste en la percepción directa del objeto de investigación y constituye el instrumento universal del investigador. Se utiliza para observar la disminución del por ciento de S en relación al espesor del sobre repello calizo”,
- **Método experimental:** se crean las condiciones o adecuan las existentes en el estudio de las propiedades y relaciones del objeto. Se utilizó para aislar el objeto y las propiedades que se estudian de otras influencias no esenciales; en reproducir la tecnología metodología para la desulfuración del hierro gris por el método de sobre repello calizo, en la obtención del hierro con grafito esferoidal por el tratamiento (*in mold*) y el uso el método de “Vertido Vibratorio” y para modificar las condiciones bajo las cuales tienen lugar el fenómeno de forma planificada. Además, para verificar la hipótesis formulada.
- **Métodos de medición:** se desarrollan con el objetivo de obtener información numérica acerca de una propiedad o cualidad del objeto o fenómeno, comparando magnitudes medibles y conocidas, según una unidad de medida. Se aplicó para medir el espesor del sobre repello y porcentaje de S.

Los **resultados esperados** de la investigación se expresan en la desulfuración mínima necesaria para la obtención de hierro con grafito esferoidal con el uso de sobre repello calizo, el tratamiento (*in mold*) y el uso del método de “vertido vibratorio”,

Como aporte **científico** la investigación demuestra la importancia y actualidad al lograr por primera vez, en las condiciones de la industria metalúrgica, la aplicación del método de desulfuración con sobre repello calizo en la producción de hierro con grafito esferoidal por el tratamiento (*in mold*) y el uso del vertido vibratorio para

augmentar en esta tecnología la competitividad, la sostenibilidad y la sustentabilidad. Además, el establecimiento de una tecnología de desulfuración de hierro gris adecuada al método de vertido vibratorio para lograr la disminución del por ciento de azufre necesario para la obtención del hierro con grafito esferoidal en el molde.

La investigación se estructura de la siguiente forma:

INTRODUCCIÓN.

CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DE LA PRODUCCIÓN DE HIERRO GRIS EN HORNOS DE CUBILOTE Y LOS MÉTODOS DE DESULFURACION EN LA OBTENCIÓN DE HIERRO GRIS CON GRAFITO ESFEROIDAL.

Se presenta un análisis de la revisión bibliográfica realizada, donde se examinan los aspectos esenciales relacionados con la tendencia actual de la producción de hierro gris en hornos de cubilote y los métodos de desulfuración en la obtención de hierro con grafito esferoidal.

CAPÍTULO 2 TECNOLOGÍA DE DESULFURACIÓN CON SOBRE REPELLO CALIZO EN HORNO DE CUBILOTE.

Se desarrolla la tecnología de desulfuración de sobre repello en crisol de horno de cubilote en la obtención de hierro con grafito esferoidal, se exponen los procedimientos y métodos utilizados en el desarrollo de la investigación, además se realiza la valoración medioambiental, económica y el aporte para la defensa, de esta investigación.

Conclusiones.

Se establecen los resultados de la investigación en correspondencia con los objetivos planteados.

Recomendaciones.

Se relacionan aquellos aspectos que permitirán cumplimentar y ampliar la investigación desarrollada.

Bibliografía.

CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DE LA PRODUCCIÓN DE HIERRO GRIS EN HORNOS DE CUBILOTE Y LOS MÉTODOS DE DESULFURACIÓN EN LA OBTENCIÓN DE HIERRO CON GRAFITO ESFEROIDAL.

1.1 Hornos de cubilote [12,19, 20,21, 27, 28, 30, 31,32, 35,38]

En el mundo se han construido y trabajan cubilotes con productividad desde 1-100 t/h. De ellos los más usados son los que poseen una productividad de 5-35 t/h. Muchos de estos cubilotes (más del 90%) usan como combustible el coque y son de tipo abierto debido a que los subproductos de la combustión, conjuntamente con partes de polvo, son lanzados a la atmósfera a través de la chimenea.

En estos cubilotes por cada kg de coque (combustible) que se usa, se forman 6,5 – 7 m³ de gases, los que contienen de 8 -22 % de CO y de 8-24 mg de polvo en cada m³. En correspondencia con el uso de estos cubilotes en los últimos tiempos se han establecido normas a escala mundial para la expulsión de gases a la atmósfera que permiten hasta 0,1 % de CO y hasta 0,1 mg de polvo por cada m³ de gas, es decir que el uso de estos cubilotes viola las normas establecidas para la protección del medio ambiente en 80-220 veces para el polvo.

A pesar de algunas particularidades constructivas de los cubilotes que trabajan con el uso de coque en calidad de combustible (tipo abierto), esto se siguen usando. Este es un horno de cuba dentro del cual ocurre el quemado del coque, y el calor desprendido por este, ante todo, garantiza las posibilidades de fusión de la carga metálica y la obtención de hierro fundido.

El aire impulsador que sale de las toberas (con el 21% O₂ y 79% N₂ del volumen) atraviesa la cama de coque y el oxígeno entra en acción con el carbono del coque en una reacción exotérmica. El calor desprendido por esta reacción calienta los gases del horno, los cuales al salir de la zona de la cama de coque por encima de las toberas funden la carga metálica y el fundente que descansa sobre esta, las gotas del metal líquido y la escoria pasan a través del coque incandescente (al rojo) donde se sobrecalienta cayendo al crisol, donde ocurre una carburación intensiva. Luego la escoria y el hierro fundido se sacan del horno. A medida que se funden las capas de carga metálica ininterrumpidamente ocurre el quemado del coque y la altura de la cama del coque disminuye. Para mantener el nivel inicial de la cama de coque, por cada porción de la carga metálica se introduce una carga de coque, la cual después de fundida la carga metálica, según su orden irá a formar parte de la cama de coque. Es decir, durante el fundido ocurre una oscilación de la zona de fusión, pero su altura media se mantiene a un nivel determinado.

En casos aislados no se usa una carga ordenada de niveles de coque y metal con fundente, sino una carga donde se mezclan el coque, el metal y el fundente, en este caso la zona de fusión disminuye y también disminuye el nivel de la cama de coque por encima de las toberas. A medida que ocurre la fusión en la parte alta del cubilote ocurre una carga ininterrumpida de metal, fundente y coque, lo que garantiza un proceso ininterrumpido de la obtención del hierro fundido.

El cubilote está constituido por las siguientes partes:

a) Envoltura cilíndrica de chapa de acero soldada.

- b) Revestimiento interno de material refractario (entre este y la envoltura se deja una capa intermedia de unos 2 cm, rellena de arena seca, para permitir las dilataciones radiales y axiales de refractario).
- c) Chimenea y su correspondiente cobertura. Algunas veces se añade apaga-chispas.
- d) Boca de carga: pequeña y provista de una plancha inclinada para la introducción de las cargas cuando se realizan a mano, más amplia si se hace mecánicamente.
- e) Cámara de aire anular, de plancha delgada, que circunda del todo o en parte la envoltura y dentro de la cual, pasa aire o viento (enviado por una máquina soplante) para la combustión del coque.
- f) Toberas, de hierro colado o chapas de acero, en forma de caja horadada y adaptada al revestimiento para conducir el aire al interior del cubilote. En la parte correspondiente de cada tobera, la pared exterior está agujereada y provista de portillos con mirillas (de mica o cristal) para vigilar la combustión.
- g) Piquera de escoria. Abertura dispuesta a unos (15 o 20) cm aproximadamente por debajo del plano de toberas, inclinada de (30 a 40) °, respecto a la horizontal, para facilitar la salida de la escoria.
- h) Puerta lateral de encendido y limpieza. Antes de cerrarla, al comienzo de la fusión, hay que rehacer el murete que completa el revestimiento.
- i) Canal de colada, de plancha de hierro, revestido de masa refractaria. Mantiene la misma inclinación de la solera (10°), para hacer caer el hierro fundido en el caldero de colada.

j) Solera a fondo de cubilote: consiste en arena de moldeo apisonada e inclinada 10° hacia la piqueta de sangrado del horno.

k) Plancha base de envoltura cilíndrica: de hierro colado o chapa fuerte. En su centro hay una abertura del diámetro de la solera, que puede cerrarse con un portillo de descarga de uno o dos batientes que se abren hacia abajo por medio de un cerrojo, de una palanca o quitando el puntal. A través de ella se descarga el contenido de coque de la cama, al final de la operación del horno.

l) Columnas de apoyo: casi siempre son cuatro, de hierro fundido y son sostenidas a su vez por unos cimientos de ladrillos de hormigón.

m) Crisol: es la parte inferior del cubilote comprendido entre la solera y el plano de las toberas. Se estima que el metal ocupa en él, el 46 % del volumen. El 54 % restante está ocupado por coque incandescente.

1.2 Fundamento metalúrgico de la fusión en cubilotes. (Ver figura 1.1) [27, 32, 38, 40,41]

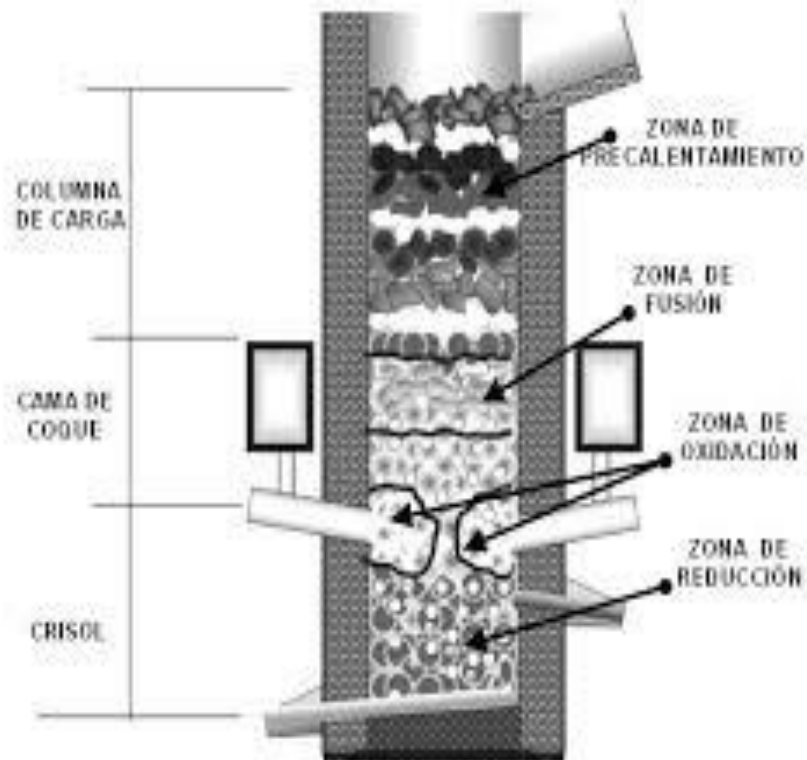


Figura 1.1 Zonas de cubilote

Zonas de cubilotes

El cubilote es un aparato térmico que ha dado lugar a dos escuelas de interpretación de su funcionamiento. La primera considera al cubilote como un horno en el cual el coque actúa primeramente como un combustible sólido en lecho más o menos fijo y permeable al gas comburente y a los gases de combustión, estando en íntimo

contacto con el metal, con lo que se produce un intercambio térmico a contracorriente. Las cargas metálicas, al ir descendiendo en el interior del cubilote son continuamente precalentadas por los gases calientes debido a la combustión. Como los gases calientes salen del horno a una temperatura relativamente baja, esto significa que parte del calor sensible se ha transferido a la carga. Por este motivo el cubilote, comparado con otros hornos de fusión, tienen una eficiencia térmica relativamente elevada. Sin embargo, los gases de escape contienen una apreciable cantidad de CO, lo que indica una combustión incompleta y por tanto, una disminución en el rendimiento térmico.

Por su parte, la escuela metalúrgica asemeja el cubilote a un reactor químico en el que se producen reacciones gas-gas, gas-líquido, gas- sólido, líquido –líquido y líquido – sólido, que no llegan a completarse debido al poco tiempo de permanencia en el interior del cubilote. A diferencia de otros hornos de fusión, el cubilote permite una elaboración del metal que dependerá de las condiciones de marcha, de la carga metálica, del coque y de los fundentes empleados. En realidad hay que considerar el cubilote desde ambos puntos de vistas y para estudiar los fenómenos que tienen lugar durante la fusión del hierro es imprescindible definir las zonas de aquel, pudiéndose distinguir desde el tragante hasta la salida del hierro líquido y la escoria las siguientes:

- Zona de precalentamiento.
- Zona de fusión.
- Zona de gasificación o reducción.
- Zona de combustión.
- Zona del crisol.

1.3 Influencia del azufre en la obtención del hierro con grafito esferoidal. [1,4, 11, 13,15, 16,17, 18,22, 24, 25, 30, 33,34, 36, 35]

- **Contenido de azufre del metal base.**

Es importante controlar el nivel de azufre del metal base, ya que interviene en la eficiencia del magnesio, es decir en la economía del proceso, así como en la obtención de una nodularidad aceptable en las piezas.].

Para este proceso se recomienda un nivel de azufre de 0,01% para así minimizar el uso de la aleación nodulizante.

Pueden utilizarse mayores valores de azufre, pero tendrán que ser empleados mayores niveles de magnesio, con una posible tendencia a formar escorias de sulfuro de magnesio, silicatos de aluminio-magnesio y por lo tanto defectos y un aumento del costo.

Debido a que existe una gran afinidad entre el azufre contenido en el metal base y el magnesio contenido en el nodulizante adicional, durante el tratamiento se desarrollan ciertas reacciones químicas, una de ellas es la siguiente:



De la estequiometría de esta reacción se puede deducir el por ciento de magnesio necesario para neutralizar el efecto nocivo del azufre sobre la nodulización.

$$\text{El \% Mg necesario} = \% \text{ S del metal} \cdot x 0,76 \quad (2).$$

Debido a que las pruebas fueron realizadas bajo condiciones de producción se realizó un estudio estadístico de la composición química promedio del metal base con el propósito de determinar la factibilidad de la producción bajo estas condiciones específicas.

Para esto se tomaron datos de la composición química de 45 coladas (datos del año 2016) analizándose elementos tales como el C, Si, Mn, P, y S. Estos datos fueron introducidos en un programa de procesamiento estadístico obteniéndose los siguientes valores. Se debe aclarar que esto fue realizado en el taller de fundición de la UEB "Héroes del 26 de Julio"

C -3,26 con un porciento de repetición de 25,6

Si -2,40 con un porciento de repetición de 24,4

Mn -0,51 con un porciento de repetición de 29,6

P -0,12 con un porciento de repetición de 24,1

S- 0,03 con un porciento de repetición de 34

Si se analizan los resultados obtenidos y se comparan con la bibliografía consultada se puede observar que el porciento de S es un elemento difícil de controlar según las características del proceso de fusión en el cual se va a aplicar la tecnología se encuentra en un 50% por encima de lo recomendado.

A pesar de lo expresado anteriormente y teniendo en cuenta que la recomendación se refiere cuando la producción se realiza a gran escala.

Se llega a dos conclusiones:

1)- Es necesario aplicar una tecnología de desulfuración en cazuela para la producción de hierro con grafito esferoidal a gran escala en esta empresa, debido a que el porcentaje de S se encuentra algo alterado y esto provocaría un encarecimiento del proceso.

2)- El porcentaje de S no influye notablemente para la ejecución de trabajos experimentales a pequeña escala pues se puede suplir el efecto desmodificador del mismo con aumento de Mg cuestión que en la producción a gran escala afecta la economía del proceso.

El valor del carbono equivale con mayor índice de repetición es de 4.004% con una incidencia de 24%, en el resto de los casos su magnitud es inferior a esta (se recomienda en la bibliografía entre 4,2 y 4,5%). Esto se debe a la falta de arrabio en la composición de la carga, actualmente en su lugar se utiliza un recarburante y se aplica la tecnología de producción de hierro sintético con la siguiente composición de la carga:

Chatarra de acero - 20%.

Chatarra de hierro - 20%.

Retorno - 60%.

Como se puede observar, la magnitud del carbono equivalente en ninguno de los casos, es la indicada para la producción de hierro con grafito esferoidal. Esto condujo a la necesidad de implementar el método (*In mold*) como tecnología para la producción de hierro con grafito esferoidal por su alta asimilación del magnesio, además al aplicar este método no es imprescindible la "inoculación" pues es característico del mismo un buen conteo de nódulos.

Analizando las experiencias nacionales en la producción de hierro con grafito esferoidal, en todos los casos la principal causa que motivó la paralización de la producción es el bajo valor de carbono equivalente obtenido como promedio en las industrias.

Si se analizan los resultados obtenidos y se comparan con la bibliografía consultada, se puede observar el que el porcentaje de azufre, elemento difícil de controlar según las características del proceso de fusión en el cual se va a aplicar la tecnología se encuentra en un 50% por encima de lo recomendado.

A pesar de lo expresado anteriormente y teniendo en cuenta que la recomendación se refiere a cuando la producción se realiza a gran escala llegamos a dos conclusiones:

Es necesario aplicar una tecnología de desulfuración en cazuela para la producción de hierro con grafito esferoidal a gran escala en esta empresa, debido a que el porcentaje de azufre se encuentra alterado y esto provocaría un encarecimiento del proceso.

El contenido de azufre no influye notablemente para la ejecución de trabajos experimentales a pequeña escala pues se puede suplir el efecto desmodificador del mismo con aumento de magnesio cuestión que en la producción a gran escala afecta la economía del proceso.

Producto de la ausencia de arrabio y la introducción de chatarra de hierro rica en azufre, en datos tomados en el año 2001 el contenido medio de azufre en el metal base producido en la UEB (Héroes del 26 de Julio) era de 0,067% aumentado este en 44,77% con relación al contenido de azufre promedio controlado en el año 1998.

Influencia del azufre.

Con respecto al análisis de la composición química del metal base, y la presencia de un contenido de azufre por encima de las recomendaciones dadas por diferentes autores con respecto al método (*in mold*) y como resultado de experimentos realizados donde se elimina el exceso de azufre con el uso del propio magnesio como desulfurante, se concluye que a medida que aumenta el contenido de magnesio introducido, los valores de resistencia a la tracción aumentan desde 292 MPa para un magnesio residual de 0,012% y un contenido de azufre de 0,0187% y luego de modificar hasta 540,2 MPa para un magnesio residual de 0,043 y un contenido de azufre de 0,0165 %.

Es decir, que con una disminución del contenido de azufre en 11,7% el magnesio residual aumenta 27,9 % y los valores de resistencia a la tracción en 54%. Esto se puede explicar debido que en el momento del cálculo del rendimiento para la tecnología del (*in mold*) por la metodología de Dunks, se tomó el menor valor de rendimiento (se recomienda 80-90%), teniendo en cuenta que en este caso las pérdidas de magnesio por evaporación y oxidación se consideran nulos, por la ausencia de contacto entre el nodulizante y la atmósfera, así como la disolución ocurre en un sistema cerrado donde la evaporación se dificulta, entonces ocurre una mayor asimilación del magnesio, lo que se puede apreciar en el aumento brusco del magnesio residual.

También si se tiene en cuenta las propiedades del magnesio como estabilizador de carburos, lo que se puede apreciar en las microfotografías donde se parte de una matriz ferrito perlítica (90-10) en el caso que se introduce menor cantidad de

magnesio hasta una matriz ferrito perlítica (15-85) en el caso que se introduce mayor cantidad de magnesio, lo que justifica la diferencia notable en los valores de resistencia a la tracción entre uno y otro experimento.

Si se mantiene constante el contenido de los elementos que por sus características pueden ser formadoras de inclusiones (titanio (Ti), volframio (V), molibdeno (Mo), cromo (Cr), etc.), el número de inclusiones, con un aumento de las dosis de azufre pueden llegar hasta 33 valores de a en el modelo exponencial logarítmico.

El número de inclusiones aumenta a una velocidad de $e^{-21,8033 (\%S)}$ como valor medio de crecimiento por cada dosis de azufre que se introduzca a la aleación.

A partir del contenido de azufre de 0,017398 denominado punto de inflexión de la curva la concentración de inclusiones aumenta con un crecimiento progresivo de

$$e^{-21,8596 (\%S)} \quad (3)$$

El máximo valor de resistencia a la tracción que se puede obtener bajo las condiciones específicas de este experimento y en función el contenido de azufre es de 554.5MPa valor que corresponde con el límite máximo de crecimiento. Por cada dosis de azufre los valores de resistencia a la tracción decrecen a una velocidad media de

$$e^{-10906,7745 (\%S) -15,4801} \quad (4)$$

A partir de un contenido de azufre de 0.017799 denominado punto de inflexión los valores de resistencia a la tracción comienzan a decrecer bruscamente a una velocidad de $e^{-58580,0016 (\%S) -25,9425}$ haciéndose más pronunciada la tendencia a las bajas de los valores de resistencia a la tracción.

Al realizar un análisis conjunto de ambos modelos matemáticos se puede deducir que en el intervalo de contenido de azufre entre 0,017398 y 0,01779 (puntos de inflexión para ambos modelos) comienza un crecimiento de la velocidad de aumento de inclusiones así como aumenta la velocidad de crecimiento de los valores de resistencia a la tracción. Esto demuestra la relación estrecha entre el contenido de azufre y la acumulación de inclusiones y los valores de resistencia a la tracción.

Por otra parte, la expresión de "magnesio necesario para neutralizar el azufre" utilizada en los cálculos de la cantidad de nodulizante a introducir, no se puede tomar literalmente pues, quedó demostrado que siempre quedará un azufre remanente que influye sobre las propiedades mecánicas.

La relación existente entre el porcentaje de magnesio introducido y el magnesio residual obtenido tiene un carácter proporcional y corresponde a la siguiente ecuación:

$$Mg_{\text{resid.}} = -36464(Mg_{\text{intrd}})^3 + 7909,5(Mg_{\text{intrd}})^2 - 5677,32(Mg_{\text{intrd}}) + 13,479 \quad (5)$$

$$R^2 = 0,9896.$$

Donde:

Mg_{resid} - magnesio residual (%)

$Mg_{\text{intrd.}}$ - magnesio introducido (%)

En la muestra con 15% de magnesio por debajo del recomendado por el cálculo de *Dunks* se observan inclusiones en los límites intergranulares a razón de 25 por campo de visión de 450 aumentos. En la muestra con 10% de magnesio por debajo

del recomendado por el cálculo de *Dunks*, se observan inclusiones en los límites intergranulares a razón de 19 por campo de visión de 450 aumentos. En la muestra con 5% de magnesio por debajo del recomendado por el cálculo de *Dunks* se observan inclusiones en los límites intergranulares a razón de 13 por campo de visión de 450 aumentos. En la muestra con el porcentaje de magnesio recomendado por el cálculo de *Dunks* se observan inclusiones en los límites intergranulares a razón de 7 por campo de visión de 450 aumentos.

En la muestra con 5 % de magnesio por encima del recomendado por el cálculo de *Dunks*, se observan inclusiones en los límites intergranulares a razón de 3 por campo de visión de 450 aumentos.

En la muestra con 10% de magnesio por encima del recomendado por el cálculo de *Dunks*, se observan inclusiones en los límites intergranulares a razón de 2 por campo de visión de 450 aumentos.

Existe una relación entre el contenido de azufre y el número de inclusiones intergranulares que responde a la siguiente ecuación:

$$Y = 33,7404 / 1 + (17370178,9857D + 10 \cdot e^{-21,8033 (\%S)}) \quad (6)$$

Donde:

Y- número de inclusiones.

%S- porcentaje de azufre.

La relación que existe entre la resistencia a la tracción y el número de inclusiones responde a la siguiente ecuación:

$$Y = 554,5002 / (1 - e^{-10906,7745 (\%S)}) \quad (7)$$

Donde:

Y-resistencia a la tracción (MPa)

%S- porcentaje de azufre.

Donde se encuentra mayor porcentaje de inclusiones los valores de resistencia son mucho menores los cuales disminuyen hasta 292MPa (esto significa un 54% de disminución de las propiedades en comparación con los valores máximos).

El aumento del contenido de magnesio trae como consecuencia la disminución del contenido de azufre, a su vez, a medida que disminuye la concentración de azufre disminuye la concentración de inclusiones en los límites intergranulares y aumentan los valores de resistencia a la tracción. Es decir existe una relación inversamente proporcional entre el azufre y la resistencia a la tracción y directamente proporcional entre el contenido de azufre y la concentración de inclusiones lo que se expresa en las ecuaciones mostradas anteriormente. No es recomendable la utilización del magnesio como agente desulfurante pues encarece el proceso así como se puede observar que si utilizamos el 15% por encima del calculado por las recomendaciones de *Dunks* existe una tendencia al bloqueo aunque se observa unos valores de resistencia a la tracción de hasta 540,2MPa y una elongación de hasta 4% estos valores son semejantes a los del acero fundido por la norma GOST. 1577-81(FA 35).

Es de gran importancia reflexionar sobre un aspecto que está presente en todas las referencias bibliográficas analizadas, en estas se plantea categóricamente que se recomienda para el caso de la utilización del (*In mold*) un contenido de azufre en el metal base de 0,0015%, como es reconocido bajo las condiciones propias de la

fundición en Cuba, es prácticamente imposible partir de un metal base inicial con esa concentración de azufre, por razones ya discutidas. En este caso, para la nodulización se parte de una concentración inicial de azufre de 0,025 % y luego utilizando el mismo modificador como desulfurante, se logra un contenido de azufre final en dependencia de la cantidad de nodulizante introducida. Es decir, que como resultado de las investigaciones realizadas se puede definir que, a partir de un azufre inicial de 0,025% si logramos disminuir el contenido final del mismo hasta valores de 0,0165%, el azufre no ejerce ningún tipo de influencia sobre la concentración de inclusiones y se logran valores de resistencia a la tracción de 540,2 MPa, además de lograrse 350 nódulos por campo, un 100% de nodulización, factor de forma 0,94 y estructura metalográfica aceptable según la ASTM (HN530-4).

Cuando el metal base porta el contenido de azufre recomendado (0,0015%) el consumo de nodulizante para obtener un magnesio residual de 0,04% con un rendimiento en la nodulización de 80% es de 87g. Sin embargo, si partimos de un azufre inicial de 0,025% y se quiere lograr que el metal obtenido posea propiedades aceptables, además de lograr la eliminación del efecto nocivo del azufre sobre la atracción hacia el de las inclusiones en los límites intergranulares, se necesita la utilización de 105,3g de nodulizante para las mismas condiciones planteadas en el caso anterior, lo que significa un consumo de un 17,37% más de nodulizante. Esto no es recomendable, por lo tanto, se deduce que se hace necesario utilizar un método de desulfuración que permita obtener un contenido de azufre acorde con los requerimiento de la tecnología con el menor costo posible.

1.3 Desulfuración [1, 3,5, 6, 7, 9, 24, 25, 26, 30, 35,37]

Los fundidores conocen muy bien los problemas asociados con la adición de magnesio al hierro fundido para la formación de grafito esferoidal. Mientras el azufre

y oxígeno se encuentren en el caldo, parte del magnesio se usará como agente desulfurante y desoxidante. El magnesio remanente se usa para lograr la esferoidización. Si el contenido de azufre en el hierro base es bajo, se reducirá la gran variedad de productos de reacción producidos por el magnesio. Muchos fundidores se aprovechan de esta circunstancia produciendo un hierro bajo de azufre, bien sea fundiendo con horno eléctrico, o mediante la introducción de un método desulfurante en el proceso.

El desulfurante más usado en este tratamiento es el carburo de calcio (C_2Ca), pero existen también otros productos que pueden producir resultados similares.

Estos son:

- Sosa cáustica ($NaOH$)

- Carbonato sódico (CO_3Na_2)

- Cal (CaO)

- Caliza (CO_3Ca)

- Cianamida cálcica (CN_2Ca)

De estos, la sosa cáustica se usa raramente debido a su peligrosidad, la caliza se debe reducir primero a CaO antes de desulfurar y la cianamida cálcica debe excluirse porque aumenta el contenido de nitrógeno del hierro de base con el consiguiente peligro de originar en las piezas los defectos producidos por el nitrógeno.

En los hornos de inducción no se practica la desulfuración inducida por escoria debido a la lentitud de este procedimiento. Para el caso del CaC_2 , la investigación

canadiense ha desarrollado una fórmula para la evaluación de la eficiencia de la desulfuración.

$$E = \frac{\log(S_0 : S_f)}{\%CaO_2} \quad (8)$$

Donde:

S_0 y S_f son los contenidos inicial y final de azufre (%). % CaO_2 es la cantidad de CaO_2 añadido en por ciento de peso.

La ventaja de esta fórmula es que se pueden comparar los valores de la eficiencia (E) de los métodos o prácticas y las diferencias se reflejarán sobre la eficacia y no sobre la velocidad de la transferencia de S al CaC_2 . La velocidad de transferencia de S depende, por supuesto, del contenido inicial de S.

Se ha observado que la eficacia de la desulfuración con el método de inyección aumenta invariablemente a medida que el tamaño de partícula del CaC_2 disminuye. Un hallazgo muy interesante es que al aumentar la superficie total de CaC_2 inyectado no aumentaba la velocidad de transferencia de azufre. En los experimentos citados, independientemente del tamaño de partícula, del 8 al 10% aproximadamente del radio de las partículas de CaC_2 se convertía en CaS . Si el tiempo de permanencia dentro del caldo hubiera sido más largo, se habría conseguido una penetración mucho más profunda.

Todos los procesos de desulfuración deben cumplir los siguientes requisitos:

-Máximo contacto posible entre el caldo y el desulfurante.

-Alta agitación del conjunto hierro/desulfurante.

-Asegurarse que el tratamiento sea económico, que contemple no sólo la desulfuración en sí sino también el desescoriado necesario después de la desulfuración.

Métodos de desulfuración.

Hay varios métodos que se usan para la desulfuración y nodulización simultánea. Consisten en eliminar el azufre por reacción con el magnesio, como SMg, quedando todavía suficiente magnesio para producir la nodulización. Estos métodos son:

-Introducción de Fe-Si-Mg (para % de S inferiores a 0,04)

-Introducción de Ni-Mg.

-Tratamiento con magnesio puro (en el convertidor o por inmersión), o con aportación de magnesio en forma de alambre.

Para desulfurar, solamente hay dos métodos: En forma intermitente y en forma continua.

Método de desulfuración en cazuela para llevar el contenido de azufre a los límites establecidos para la producción de hierro nodular mediante el procedimiento (*in mold*).

El logro de este método consistió en la elección del material desulfurante y dicha elección se realizó entre el carburo de calcio y la caliza. Como resultado de dicho trabajo se decidió la utilización del carburo de calcio teniendo en cuenta el carácter menos endotérmico de su descomposición en comparación con la caliza así como la

estabilidad del mismo. Así como la alta higroscopicidad de la caliza, además es conocido que la caliza se descompone con la humedad ambiental y es necesario almacenarla en contenedores especiales.

Como agente activador del desulfurante se trabajó con aire comprimido seco, para eliminar la posible humedad que puede portar el aire se construyó una instalación de secado del aire, que consiste en la conexión de una tubería de cobre acoplada al compresor, la misma es enrollada en forma de espiral a lo largo de la chimenea de escape de los gases calientes del horno, el aire se calienta hasta 110 °C, al final se coloca un filtro que atrapa la humedad que puede tener el aire. Para el soplado se construyó un dispositivo.

- **Desulfuración intermitente**

A veces, los condicionantes de la producción hacen que se separe la unidad de tratamiento de la unidad furosa (por ejemplo un cubilote de picada intermitente). Se desulfura y después se trasfiere el caldo desulfurado a un antecrisol. Esto exige el uso de una cuchara de suficiente capacidad como para contener aproximadamente un 20% más que el peso de la picada, y así asegurar un espacio libre necesario para la agitación. La cuchara además tendrá una relación altura/diámetro próxima a uno. En el fondo de la cuchara se instala una briqueta porosa para soplar nitrógeno (N₂) a través y provocar la agitación del metal.

Para reducir el azufre del nivel de 0,10% a un nivel inferior a, 0,02% hace falta usar entre 1,4% y 2% de C₂Ca, agitado durante aproximadamente tres minutos.

La eficiencia del tratamiento depende en gran medida de estos factores concretos:

-Tiempo de agitación (entre dos y cuatro minutos para un contenido de 0,10%) y

calidad de la acción agitadora.

-Temperatura del caldo a tratar (cuanto más temperatura, más rápida es la reacción).

-También son importantes la calidad y el tamaño de grano del C_2Ca . Este material debe ser específicamente diseñado para este uso concreto (como regla, fabricado con 14/18% de cal (CaO), para que baje el punto de fusión). El tamaño de grano ideal entre 0,1 y 1mm . Sin embargo, a menudo el tamaño de grano del C_2Ca usado está entre uno y tres milímetros para compensar las pérdidas debidas al nivel de humedad.

-La adición del desulfurante cuando la cuchara está llena hasta las 2/3 partes o llena (después del desescoriado).

- **Desulfuración continua**

Cuando se trabaja con un cubilote de cuatro toneladas /hora en dúplex con un horno de crisol o un antecrisol. La desulfuración continua se considera como el método más racional. Hay muchas formas de lograr la desulfuración continua: uno de los métodos más simples es el de "contracorriente", que crea una auto-agitación. Sin embargo, este método lógicamente es menos eficiente que el método de desulfuración por inyección en la piquera del cubilote o en el sistema dúplex con la introducción de nitrógeno. La presión de N_2 debe ser prefijada si se quiere obtener una agitación eficiente y suficiente en el sistema dúplex.

Hay otras formas de producir una agitación continua o intermitente: Las cucharas agitadoras, la bomba *Osterberg*, el agitador de *Rheinstahl* etc., los cuales se recomiendan fundamentalmente para tratamientos a gran escala.

Volianik en su tecnología aplica el soplado del desulfurante (Na_2CO_3) mediante el argón. El mismo proviene de una planta de producción de este gas inerte. Es impulsado a la cazuela de vertido directamente desde la instalación a una presión de 6 atmósferas y se introduce dentro del metal con la ayuda de una lanza de soplado. El carbonato de sodio tiene menor efecto desulfurante que los de base de calcio, pero presenta a ventaja de su fácil solubilidad en el metal.

En este caso se vio limitado en primer lugar por el déficit de carbonato de sodio y su alto costo en el mercado. El argón también es deficitario, y para lograr una presión estable en el soplado, es necesaria la construcción de una instalación de soplado conectada a una planta de la misma forma que la aplicada por *Volianik*. Como se puede observar, utilizar la misma tecnología requiere de costosas inversiones. En el caso de la tecnología de *Volianik* se logran rendimientos de hasta 95% en la desulfuración.

Por los motivos anteriormente planteados, es que se hace necesaria la variación de desulfurante. Se decidió la utilización del carburo de calcio teniendo en cuenta el carácter endotérmico de su descomposición $\Delta H=265$ kJ en comparación con la caliza $\Delta H=-132$ kJ así como la estabilidad del mismo. Otro factor que tuvo influencia en la decisión es la alta higroscopicidad de la caliza además es conocido que la caliza se descompone con la humedad ambiental y es necesario almacenarla en contenedores especiales.

Para la activación del mismo se utiliza el aire comprimido (presente en todas las fundiciones), pero es imprescindible el secado del mismo para evitar la introducción de humedad al metal con su influencia negativa. Se construye una instalación de secado que consiste en una tubería de cobre enrollada en forma de espiral a lo largo de la tubería de escape de los gases del horno de secado de los machos. Se calcula

la cantidad de vuelta del espiral hasta lograr una temperatura de 100°C. Al final se coloca un filtro deshumectador que condensa el agua presente en el gas y la retiene así evita la introducción del mismo al metal.

Si se tiene en cuenta los aspectos analizados, demuestra que para los procesos de desulfuración donde la misma se realiza mediante un agente activador que aumente la cinética del proceso la velocidad de la reacción de desulfuración depende de los siguientes factores:

$$V_s = K \cdot S F_R \quad (9)$$

Donde:

F_R - área de contacto del reaccionante (Ca) con el metal.

Teniendo los factores que influyen sobre F_R es deducible la siguiente fórmula:

$$F_R = K P t / \gamma \cdot g \quad (10)$$

Donde:

K- es un coeficiente que depende de la de la estabilidad de la reacción de formación del sulfuro a la temperatura dada.

P- presión de soplado del desulfurante.

t- tiempo de soplado (s)

γ - viscosidad del metal a la temperatura dada.

g- granulometría del desulfurante (mm)

El coeficiente K es constante para un ΔT determinado y depende del valor de ΔG para un elemento desulfurante dado.

La presión de soplado (P) es de gran importancia porque la misma determina la magnitud del arrastre del desulfurante en dependencia de las dimensiones del grano y el grado de agitación del caldo, este parámetro es difícil de variar, pues en la mayoría de las fundiciones del país solo se trabajó con presión de 6 atm, por lo tanto aplicar una tecnología donde se mida la magnitud de la desulfuración en dependencia de la variación de la presión de soplado es demasiado complejo desde el punto de vista operativo.

El tiempo de soplado (t) determina, la magnitud de la cantidad de partículas arrastradas al metal y el tiempo de agitación. A mayor tiempo de soplado más partículas son arrastradas al metal y es mayor el tiempo de agitación, por lo tanto aumenta el área de contacto.

La viscosidad (ν) del metal es importante, pues la misma define la facilidad con que se mueven las partículas del desulfurante dentro del metal. A mayor viscosidad a una temperatura determinada menor movimiento de las partículas y menor desulfuración, de esto se deduce que la temperatura es otro factor importante pues la misma influye sobre la viscosidad. En los experimentos no se realizó variación de a temperatura, la misma se tomó constante a los valores adecuados para la producción de hierro con grafito esferoidal.

La granulometría del desulfurante (g) define la facilidad o dificultad para ser arrastrado el desulfurante desde el dispositivo de soplado hasta el metal y ya dentro del mismo la facilidad con que se mueva en su interior. La granulometría del carburo utilizado no debe ser superior a la del tamiz 0,63 de la norma GOST, en caso

contrario, el mismo no fluye ni se esparce con la velocidad requerida en pruebas realizadas con granulometría 1,00 y 1,6 no se obtuvieron resultados satisfactorios.

Se logra establecer una gráfica de la influencia del tiempo de soplado sobre a desulfuración y el porciento de disminución del contenido de azufre y se logra para cuatro minutos de soplado una disminución del 78% de azufre en relación con el inicial. La misma corresponde a la siguiente ecuación:

$$\text{Rend.} = 3,333(\text{TS})^3 - 22,5 (\text{TS})^2 + 55,167(\text{TS}) + 4 \quad (11)$$

$$R^2 = 1$$

Donde:

Rend.- rendimiento en la desulfuración.

TS-tiempo de soplado. La relación que existe entre el tiempo de soplado y el contenido de azufre en el metal base se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$\%S_{\text{Final}} = 0,001(\text{TS})^4 - 0,0015 (\text{TS})^3 + 0,0151 (\text{TS})^2 - 0,0404 (\text{TS}) + 0,067 \quad (12)$$

$$R^2 = 1$$

Donde:

S_{Final} – azufre final (%)

TS – tiempo de soplado (s)

Por los resultados obtenidos se demostró que es factible la aplicación de la

desulfuración en cazuela aplicando el método experimentado anteriormente con resultados aceptables siempre y cuando se garantice que el aire comprimido carezca de humedad para evitar la gasificación del metal.

Se observa que la dependencia del rendimiento de la desulfuración en relación con el tiempo de soplado es directamente proporcional. Esto se debe al aumento de área de contacto desulfurante- metal, existiendo la posibilidad de que a medida que aumente el tiempo de soplado siga en aumento el rendimiento, en el caso de esta tesis, limitados por la capacidad del dispositivo de soplado. No fue factible experimentar con mayor cantidad de desulfurante, sin embargo, partiendo de que el contenido de azufre inicial en la aleación base es de 0,067 y de que el propósito de esta tecnología es el de lograr el porcentaje adecuado para lograr la nodulización en el molde, el valor final obtenido (0,0148) para un 78% de rendimiento con cuatro minutos de soplado, es adecuado desde el punto de vista práctico.

Se considera que es posible obtener mayores valores de rendimiento aumentando la temperatura a la cual se realiza el soplado pues es conocido que uno de los parámetros que influyen en el proceso de desulfuración, es la viscosidad del metal tratado, esta disminuye con el aumento de la temperatura. En los experimentos realizados la temperatura utilizada fue de 1 460 °C y como se puede observar, se lograron resultados satisfactorios sin que la temperatura final fuera insuficiente para el proceso de nodulización en el molde (alrededor de 1 420 °C después de soplado).

En las pruebas previas, realizadas con la finalidad de comprobar la efectividad de carburo así como con el fin de tener una idea de la cantidad de desulfurante a utilizar, se dedujo que aproximadamente con el 3% de mismo en relación con la masa del metal era suficiente. En el caso de realizar los experimentos con 4% de desulfurante hubiera sido necesario la construcción de un dispositivo de soplado muy

voluminoso y por lo tanto poco manuable.

Es evidente que la utilización de una mayor cantidad de carburo traería como consecuencia mayor rendimiento en la desulfuración, pero utilizando 3% de desulfurante de la masa del metal en la cazueta se logran resultados favorables en relación con el objetivo final del proceso de desulfuración.

Un tiempo de soplado excesivo provocará la caída de la temperatura y por lo tanto una disminución del rendimiento en la desulfuración, así como se correría el riesgo de alejarse de los parámetros indicados para la nodulización en el molde en cuanto a temperatura. La presión de soplado del activador es la adecuada, ya que valores menores de la misma serían insuficientes para lograr una mezcla efectiva el carburo con el metal. No fue factible el uso de mayores valores de presión, debido a las condiciones propias del taller donde se realizaron los experimentos.

La oxidación de los elementos, después de cuatro minutos de soplado no es notable ni afecta la composición química del metal base. El número de inclusiones y suciedades introducidas por el soplado no se considera significativo, se nota una diferencia de una o dos inclusiones más, en cuatro minutos de soplado.

Se debe comentar que el régimen de explotación del horno de inducción ICHT- 6 trae como consecuencia un alto consumo energético. El horno no es desconectado durante su explotación hasta la destrucción del revestimiento, una campaña dura alrededor de 60 días. Por esa razón, el costo energético para la producción de una tonelada de hierro nodular es superior al de otras empresas pues el análisis de costo se realiza dividiendo el consumo energético durante una campaña producidas sin tener en cuenta que la mayoría del tiempo el horno está conectado consumiendo energía sin obtener piezas fundidas.

Con el empleo del esquema tecnológico propuesto, se logra la obtención de hierro con grafito esferoidal por el método (*In mold*) con la calidad necesaria y a un costo menor que el empleo de la tecnología conocida en el mundo. Bajo las condiciones de nuestro país esta información está dada por el alto costo del arrabio y de una chatarra de hierro previamente seleccionada con bajo contenido de azufre.

CAPÍTULO 2 TECNOLOGÍA DE DESULFURACIÓN CON SOBREPHELLO CALIZO EN HORNO DE CUBILOTE.

2.1. Investigación de la factibilidad física de la caliza triturada, como material base de la mezcla, para el sobre repello calizo

Con el propósito de cumplir con el objetivo propuesto en esta investigación, se realiza un diseño de investigación que se puede describir de la siguiente forma:

Partiendo del problema planteado, que consiste en implementar una tecnología de preparación para la colada del horno de cubilote del taller de fundición de la UEB (Héroes del 26 de Julio Holguín), se presentan tres tareas a resolver:

Seleccionar la granulometría de la caliza triturada con propiedades tecnológicas adecuadas para que reaccione con el caldo metálico y cumpla con las normas que rigen esta actividad; económicamente competitiva, sostenible en cuanto al impacto ambiental y sustentable según la garantía que brinde su explotación. Una vez seleccionada la caliza se debe determinar la **granulometría** propicia, que cumpla con los objetivos y régimen de explotación. Investigar la **composición de la mezcla de sobre repello**, definiendo el porcentaje de aserrín, que aporte mejores propiedades mecánicas a la mezcla y que influya físico- químicamente sobre la composición química del caldo metálico y el desgaste de la mampostería refractaria de la zona de la cuba del horno, además del porcentaje de silicato metalúrgico para aplicar el repello sobre el refractario del horno.

Una vez resuelto los problemas antes expuestos se procede a la implementación de la tecnología de Preparación para la colada del HCCA – 720 del taller de fundición de la UEB “Héroes del 26 de Julio”. Se realiza un análisis estadístico de la magnitud del

desgaste y profundidad de la erupción del revestimiento refractario en la zona de fusión del crisol del horno con la utilización tradicional del mortero refractario convencional y la magnitud del desgaste y profundidad de la erupción del revestimiento refractario empleando la mezcla refractaria base arena de vidrio.

Análisis experimental para determinar: el espesor del sobre repello

Selección de la mezcla caliza

Para la selección adecuada de la **mezcla caliza** se debe tener en cuenta: composición química, competitividad, sostenibilidad y sustentabilidad.

En cuanto a la competitividad la **mezcla caliza** debe ser barata, de mayor calidad y propiciar un mezclado rápido con el caldo metálico, esto se logra con el aserrín que al quemarse propicia el arrastre de la caliza triturada y se realizan las reacciones de desulfuración.

Según la sostenibilidad se debe tener en cuenta que el material seleccionado dañe lo menos posible el medioambiente y su impacto medioambiental sea positivo.

La sustentabilidad debe garantizar la continuidad de abastecimiento de la mezcla caliza que responda a las demandas tecnológicas.

Objetivos de la selección

La sustentabilidad actual de los métodos de desulfuración no se adapta a las condiciones del metal obtenido en el cubilote debido que al ser aplicados estos métodos el metal pierde temperatura y frecuentemente no se realiza la modificación por bajas temperaturas, por lo que no se garantiza una desulfuración estable y se ve afectada la producción de artículos de hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal.

Se selecciona la caliza por tener en su composición química de 56 a 70 % de CaCO_3 es un agente desulfurante por excelencia, el aserrín se obtiene en el taller de modelado de la Fábrica y el silicato favorecen la capacidad de mezclado, calidad en cuanto a homogeneidad y su bajo costo de producción de \$ 12,18 pesos el m^3 , la definen como más competitiva, es más sostenible porque al realizarse todas las reacciones dentro del horno las emisiones gaseosas son evacuadas por las chimeneas, además los operarios no realizan trabajos expuesto a las altas temperaturas en el momento de la desulfuración y no afectan al entorno humano, Como producto sustentable se garantiza su suministro continuado con la trituración de la piedra caliza de construcción con la trituradora de mandíbula del área de preparación de refractarios y existen canteras en el propio territorio de Holguín.

Selección de la granulometría de la mezcla caliza

La granulometría debe ser la adecuada que permita el mezclado homogéneo y la hermeticidad de la **mezcla caliza**. Para lo cual valoramos la clasificación según el tamaño del grano: muy gruesa (1 – 2) mm, gruesa (0,5 – 1) mm, media (0,25 – 0,5) mm, fina (0,1 – 0,25) mm, muy fina < 0,1 mm, estadísticamente se ha demostrado que las **mezclas calizas** son las medias, es decir las que poseen un grano entre (0,25 – 0,5) mm; según: documentación tecnológica de talleres de fundición.

Selección de la composición de la mezcla caliza

Para la selección de la composición de la mezcla caliza se definen las propiedades de la siguiente forma:

Muy poca refractariedad: para que la mezcla no resista la acción a las altas temperaturas y se destruya.

Baja resistencia mecánica: para que la mezcla no resista la presión metalostática y los esfuerzos de arrastre del proceso de fusión durante el rozamiento creado por el descenso de la carga (coque, chatarra, metal líquido, fundentes) con el revestimiento y se destruya

Baja plasticidad: baja capacidad de llenar y adherirse con exactitud a las hendiduras y cavidades de la pared del horno, destruyéndose con facilidad.

Fluidez: capacidad para fluir hacia todas las partes dañadas del revestimiento del horno en función de los esfuerzos de albañilería aplicados.

Para la determinación de la composición de la mezcla caliza de sobre repello, se partió de las proporciones usadas en la mezcla convencional aplicada a las mezclas de revestimientos refractarios: 85 % de arena sílice, 15 % de aserrín en sustitución de las arcillas y un litro de silicato metalúrgico por cada litro de agua usado en la mezcla. Con el objetivo que se quemara el aserrín y la mezcla quedara expuesta a la erosión interna del horno producida por el rozamiento del caldo metálico.

Tabla 2.1 Secuencia del experimento

| No | Granulometría (mm) | Espesor del sobre repello (mm) | | |
|----|-----------------------|--------------------------------|--------------|-------|
| | | 30 | 40 | 50 |
| 1 | 0,25 | 0,03 | 0,03 | 0,025 |
| 2 | 0,4 | 0,02 | 0,015 | 0,015 |
| 3 | 0,5 | 0,025 | 0,02 | 0,015 |

El experimento aplicado define que el por ciento de aserrín a emplearse en la mezcla de empaque es de 10 % y un 90 % de caliza con una granulometría determinada experimentalmente en 0,4 mm y 40 mm de espesor del sobre repello.

2.2 Tecnología alternativa de preparación para la colada del horno de cubilote HC – 720 mm, bajo las condiciones específicas de la UEB “Héroes del 26 de Julio” Holguín.



Fig. 2.1 Horno de cubilote HC – 720 mm Taller de Fundición de la UEB “Héroes del 26 de Julio” Holguín



Fig. 2.2 Vista inferior interior del horno de cubilote HC – 720 mm

Estructura cubilote (ver figura 2.3)

Estructura metálica del cubilote: Consiste en un cilindro vertical, formado por planchas de acero soldadas de (6 a 13) mm de espesor, montadas por secciones sobre una plancha base, que a su vez es soportada por cuatro columnas de apoyo, las cuales están fijadas al cimiento

En el centro de la plancha base se encuentra una abertura de diámetro 720 mm igual al diámetro interior del refractario del cubilote, donde se coloca la tapa de cierre y se fija por medio de un puntal.

Piquera u orificio de descarga: se encuentra en la superficie de cilindro, al frente de la posición de trabajo, a una altura de 120 mm sobre la plancha base.

En la misma situación se encuentra el canal de descarga con una inclinación de 10° hacia abajo para que el metal corra libremente.

Bigotera de escoria: es un orificio situado a 90° de la boca de descarga a una distancia de 120mm por debajo de las toberas, con un canal de descarga más corto que el de la piquera.

Toberas: son cinco y están situadas a una altura de 635mm desde la plancha base hasta la parte inferior de las mismas; esto constituye la altura de la cuba o crisol colector de metal. Las toberas son ventanas de mayor ancho que altura, cuya área total (A_{τ}) será igual al 20 % del área interior del cubilote. La forma de la tobera será rectangular, con mayor ancho que altura, rectas en la parte exterior del cubilote y cónicas aumentando el ancho y disminuyendo la altura en el interior de cubilote, manteniendo el área con relación al eje tangencial del cubilote, es decir (1,85 * 0,98) dm.

Mirillas: se encuentran en el extremo exterior de las toberas, compuestas por ventanillas de cristal, por donde se observa el proceso de la fusión y a través de ellas se puede barretear el coque para su mejor descenso.

Ventana de trabajo: se encuentra a 180° con relación a la piquera y se protege con refractario durante la fusión a través de la ventana se realiza la reparación del crisol del horno y se construye el piso, las dimensiones de ella serán de (3,0 * 4,0) dm .

Caja de aire: comienza en la parte superior de las toberas y tendrá una altura de 5,70 dm y un ancho de 3,60 dm, separado 100 mm desde la pared del cubilote, el fondo de la caja de aire se comunica con las toberas para el suministro de aire al horno.

Boca de carga: se encuentra a 180° con relación a la piquera, en la parte posterior del horno, a una altura tomada desde el piso o solera hasta su borde inferior, igual a 6 veces el diámetro interior del cubilote. Su tamaño varía de acuerdo al método de carga utilizado.

Chimenea: la altura de la chimenea debe sobresalir el techo del edificio con su correspondiente cobertura a la que algunas veces se adiciona un apaga chispas.

Ventilador: pueden ser de tipo centrífugo o de émbolo rotatorio, cuya capacidad deberá estar de acuerdo al volumen de aire necesario según la productividad del cubilote

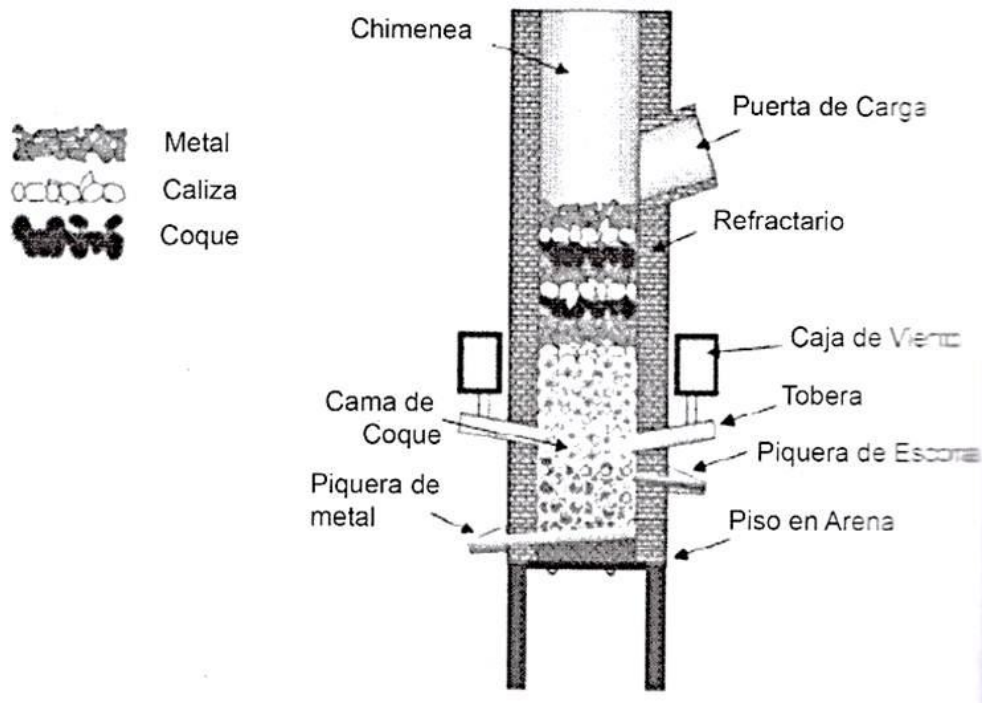


Figura 2.3 Estructura del cubilote [27, 32, 38, 40,41]

Datos técnicos:

Diámetro interior del cubilote: 7,20 dm

Área interior del cubilote: 40,6944 dm²

Altura de la cuba: 5,652 dm.

Altura de las toberas: 7,352 dm

| | | |
|--|--|---|
| <p>Elaborado por: José Antonio López González Diplomante</p> | <p>Revisado por: MSc. Rigoberto Pastor Sánchez Figueredo Dra. C. Ana María Quesada Estrada Tutores</p> | <p>Aprobado por: Ing. Antonio Mateo Rodríguez Guerra Jefe técnico</p> |
|--|--|---|

2.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

Valoración económica

La tecnología desarrollada ha permitido llegar a índices de eficiencia competitivos que han favorecido la continuidad de la producción y con una disminución del costo de producción en \$361,95 pesos por tonelada de metal fundido, permitiendo salir al mercado con un producto más competitivo.

Tomando como base comparativa el comportamiento del Rendimiento Tecnológico General (RTG) con la desulfuración tradicional y los resultados obtenidos utilizando el método de sobre repello calizo, nos permite hacer medibles la eficacia y la eficiencia por separado de los factores que determinan el costo de la producción, la productividad y competitividad de la pieza fundida de hierro, como son el Rendimiento Metálico (RM), Índice de Rechazo (Ir) y la Pérdida Metálica (Pm) los cuales se incorporan a la Tabla 2.7

El comportamiento del Rendimiento metálico es de 59,02 % en el sistema tradicional, el índice de rechazo de las piezas modificadas se mantiene es de 0,10 % y la Pérdida Metálica es de 3,5 y con el sobre repello es de 3,0 %, obteniéndose un Rendimiento Tecnológico General de 81,94 %, con una disminución de los costos de producción de 2 308,95 \$/t hasta 1 947,0 \$/t y comercializado a un precio disminuido de 2 511,68\$/t hasta 2 149,73 \$/t.

Esta variación del Rendimiento Tecnológico General disminuye los costos de producción y genera ganancias económicas que posibilitan la producción a escala industrial de fundidos de hierro utilizando el sobre repello calizo en los trabajos de

preparación para la colada del horno de cubilote del taller de fundición, bajo las condiciones específicas de la industria cubana, de una forma eficiente y competitiva.

Tabla 2.7 Comparación del comportamiento de los Índices Tecnológicos

| No | Parámetros | Métodos de desulfuración | |
|----|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| | | Método tradicional | Método de sobre repello calizo |
| 1 | Contenido de azufre (%) | 0,02 | 0,015 |
| 2 | Rendimiento Metálico (%) | 85,0 | 85,0 |
| 3 | Índice de Rechazo (%) | 0,10 | 0,10 |
| 4 | Pérdida Metálica (%) | 3,5 | 3,0 |
| 5 | Rendimiento Tecnológico General (%) | 59,02 | 81,94 |
| 6 | Costo (\$/t) | 2 308,95 | 1 947,0 |
| 7 | Precio (\$/t) | 2 511,68 | 2 149,73 |

La utilización del Método de sobre repello calizo es más competitiva porque se disminuye el costo de producción en \$361,95 pesos, se utiliza un método de desulfuración más rápido, se disminuye la pérdida metálica en 27 %, lo que permite un aumento RTG y salir al mercado con un producto con un precio menor en \$361,95 pesos.

Valoración medioambiental

El método de sobre repello calizo resultante de esta investigación, aumenta la sostenibilidad porque permite la evacuación de los gases generados durante la desulfuración desde el interior del horno sin afectar el entorno humano y humaniza las actividades de los operarios metalúrgicos al no exponerse a las altas temperaturas en el momento de la desulfuración.

Valoración del aporte para la defensa

En los talleres de Fundición de la Empresa Mecánica de Holguín se producen piezas fundidas utilizadas en la reparación y modernización de la técnica militar, que se producen en dicha entidad, siendo producidos con la tecnología desarrollada en esta investigación, los siguientes códigos:

KTP.1.02.107A Tapa. KTP.1.12.116 Polea Tensora. KTP.1.12.127 Polea.

KTP.1.04.103 Cuerpo chumacera derecha. 75W12001 Núcleo de la Rueda.

Los cuales responden a la calidad y requerimientos técnicos tecnológicos de las normas que rigen este tipo de producción.

CONCLUSIONES

1. Es necesario aplicar una tecnología de desulfuración en cazuela para la producción de hierro con grafito esferoidal a gran escala en esta empresa, debido a que el porcentaje de S se encuentra algo alterado y esto provocaría un encarecimiento del proceso
2. Se logró elaborar una tecnología para la desulfuración del hierro gris por el método de sobre repello calizo, en la obtención del hierro con grafito esferoidal por el tratamiento (in mold), aplicando el método de "Vertido Vibratorio".
3. La tecnología propuesta demuestra la factibilidad de la utilización del método de sobre repello calizo en la desulfuración del caldo metálico que ha de ser modificado en hierro gris de alta resistencia con grafito esferoidal en lugar del resto de los métodos empleados.
4. Por primera vez es utilizado el método de desulfuración de sobre repello calizo demostrándose su competitividad, sostenibilidad y sustentabilidad sobre los otros métodos de desulfuración según las condiciones de trabajo específicas del horno de cubilote.
5. El porcentaje de S no influye notablemente para la ejecución de trabajos experimentales a pequeña escala pues se puede suplir el efecto desmodificador del mismo con aumento de Mg cuestión que en la producción a gran escala afecta la economía del proceso.
6. La tecnología desarrollada ha permitido llegar a índices de eficiencia competitivos que han favorecido la continuidad de la producción y con una disminución del costo de producción en \$361,95 pesos por tonelada de metal fundido, permitiendo salir al mercado con un producto más competitivo.
7. El comportamiento del Rendimiento metálico es de 59,02 % en el sistema tradicional, el índice de rechazo de las piezas modificadas se mantiene es de

0,10 % y la Pérdida Metálica es de 3,5 y con el sobre repello es de 3,0 %, obteniéndose un aumento del Rendimiento Tecnológico General en 22,92%, con una disminución de los costos de producción de 1 361,95 \$/t y comercializado a un precio disminuido de 361,95 \$/t.

8. Con la utilización de la tecnología del sobre repello se logra disminuir el porcentaje de azufre de 0,03 % en la pieza obtenida por el método tradicional a 0,015 % obtenido con la utilización del sobre repello calizo.

RECOMENDACIONES

1. Generalizar esta tecnología en el resto de las fundiciones del País, con el objetivo de acometer a escala industrial, la producción de fundidos de hierro gris de alta calidad con grafito esferoidal

BIBLIOGRAFIA

1. BRITISH ROLLMAKERS (CHINA) LTD. Grafito Esferoidal (SG) Perlítico.
http://www.brcil.com/downloads/spanish/SGP_spanish.pdf 22-03-2016
http://www.metalactual.com/revista/10/procesos_fundicion.pdf 02-04-2016
2. FUNDIDORES: FUNDICIONES FERREAS Y NO FERREAS EN ARENA, COQUILLA Y FUNDICION A PRESION.
<http://www.metalspain.com/FUNDIDORES-NOV-2012.pdf> 12-03-2016
3. FUNDICIONES GRISES.
http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1_43_187_9_279.pdf 01-04-2016
4. Fundición gris nodular.
<http://www.scribd.com/doc/112342826/HIERRO-DUCTIL-O-NODULAR> 10-04-2016
5. FUNDINOX. ChileSA. Fundición Nodular. http://www.fundinox.cl/ASTM_A536.pdf 02-05-2016
6. Nodular.
<http://www.inti.gob.ar/jicapymes/presentaciones/FundicionGATTI.pdf> 22-03-2016
7. Hidrostal. Soluciones con Tecnología. Fundición y Mecanizado de Piezas de Fundición Nodular.
http://www.hidrostal.com.pe/images_turbinas/folleto_fundicion.pdf 22-03-2016
8. Metalografía. http://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/7643_metalografia.pdf. 22-03-2016
9. Hierro Nodular. ASTM 536.
<http://metalnodul.com/wp-content/uploads/2012/11/nodular.pdf>. 23-03-2016
10. IDEMA. Universidad de Azterlan. Proyecto Técnico y estudio de Impacto Ambiental en la nueva planta de Fundición de hierro gris y nodular. FUNDIGUEL SA BIZKAIA.



11. Instituto para el conocimiento en Fundición. Metalurgia de las Fundiciones de Hierro y Conceptos Avanzados de Caracterización.
http://www.iftabira.org/pdfs/news/Jornada%20Metalurgia_1270028729.pdf 10-04-2016
<http://www.uca.edu.sv/facultad/clases/ing/m210031/Tema%2015.pdf> 10-03-2016
12. Julio Alberto Aguilar Schafer. Hierro Fundido (Hierro Colado).
http://biblio3.url.edu.gt/Libros/2013/cml/11-Hierro_fundido.pdf 16-04-2016
13. José Luis Enríquez Berciano. Universidad Politécnica de Madrid. FABRICACIÓN DE FUNDICIÓN NODULAR.
http://oa.upm.es/14450/1/Fundici%C3%B3n_nodular.pdf 10-04-2016
14. Mejore su proceso de tratamiento de Nodular con Pq-dit.
http://www.ialonso.com/news/PQ-DIT_description_article_enes_2.pdf 20-03-2016
15. Norberto D Rivero. Thecnology Aplied to the continuos improvement.
<http://www.titania.com.ar/titania-catalogo.pdf> 24-03-2016
16. Produccion Hierro Nodular. Empresa Hayes Lemer. Mexico.
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lii/portilla_v_In/capitulo1.pdf 29-03-2016
17. SUMINDU; 2014 Especificaciones del Hierro nodular. ingenieria/Documents/Proyectosgrado/SOLIDIFICACI%C3%93N%20DE%20HIERRO S%20NODULARES.pdf 18-03-2016
18. SANDRA CAROLINA MURCIA SÁNCHEZ. 2012 Universidad EAFIT SOLIDIFICACIÓN DE HIERROS NODULARES.
<http://www.eafit.edu.co/programas-academicos/posgrado/maestria--> 29-03-2016
19. Solas Marcillo Alexis Rolando. 2013 Caracterización del Grafito de Hierro Fundido nodular Mediante Aplicación de Ultrasonido.

- 20.** Sánchez Figueredo R.P. 2007. El Rendimiento Tecnológico General como Regulador del costo de las piezas fundidas de metales ferrosos y no ferrosos. Convención Internacional de la Industria Metalmeccánica. METANICA. . CD-ISSN 1607-6261.
- 21.** Sánchez Figueredo R.P. 2010. Utilización de los desechos de vidrio en los procesos de fundición de metales ferrosos y no ferrosos. . CD – ROOM-ISBN: 1607-6281.
- 22.** Sánchez Figueredo R.P. 2011. Tecnología de impacto medioambiental en proceso de fundición de metales Taller regional sobre Medioambiente y desarrollo sostenible, ISBN: 978-959-16-1206-9.
- 23.** Hornos de cubilote.
<http://www.editum.org/Hornos-de-cubilote-p-1285.html> 18-03-2016
- 24.** Sánchez Figueredo R.P. 2012. UPADI 2012. XXXIII. Convención Panamericana de Ingenierías. Congreso medioambiente y desarrollo Humano. MADEHUMAN 2012. “Tecnologías alternativas sostenibles y sustentables en procesos de fundición de metales ferrosos y no ferrosos”. Editorial Obras.
- 25.** Sánchez Figueredo R.P. 2013. VI conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín. Ingeniería y Desarrollo. “Disminución de nodulizante en la obtención de fundidos de hierro con grafito esferoidal por el método de vertido dinámico”. Editorial Universitaria. ISBN 978-959-16-2138-2.
- 26.** Sánchez Figueredo R.P. 2013. VI conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín. Ingeniería y Desarrollo.
- 27.** Sánchez Figueredo R.P. 2013. VI conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín. Ingeniería y Desarrollo. “Mezcla de empaque de arena de vidrio para las reparaciones de preparación para la colada”. Editorial Universitaria. ISBN 978-959-16-2138-2.
- 28.** Alto-Horno-Horno-De-Cubilote.
<http://www.buenastareas.com/ensayos/Alto-Horno-Horno-De-Cubilote/37845.html> 18-03-2016

29. Sánchez Figueredo R.P. 2013. VI conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín. Ingeniería y Desarrollo. “Influencia de la velocidad de vertido y el porcentaje de nodulizante en el número de nódulos y la dureza del hierro nodular”. Editorial Universitaria. ISBN 978-959-16-2138-2.
30. Sánchez Figueredo R.P. 2013. VI conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín. Ingeniería y Desarrollo. “Influencia del porcentaje de cola en la composición química del hierro nodular”. Editorial Universitaria. ISBN 978-959-16-2138-2.
31. Tecnología de Hierro Nodular.
<http://www.fundelima.com/tapas01.pdf> 20-04-2016
32. Universidad Tecnológica de Argentina, Metalografía.
http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/15-TT_Fundiciones_v2.pdf.22-04-2016
33. UMSS – Facultad de Ciencias y Tecnología. CALIDAD DE LA FUNDICIÓN.
<http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-228.pdf> 10-04-2016
34. Fundición en horno de cubilote.
http://www.ehowenespanol.com/funciona-cubilote-como_91866/ .05-04-2016
35. Revista estudiantil de Instituto Superior minero Metalúrgico de Moa.
http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revista_estudiantil/article/viewFile/288/pdf
36. Horno de cubilote.
<http://www.buenastareas.com/ensayos/Horno-De-Cubilote/6425393.html> 18-03-2016