

# Caracterización microestructural de una fundición blanca hipoeutéctica en bruto de colada

**Dailen Romero Cobas**

[dromeroc@infomed.sld.cu](mailto:dromeroc@infomed.sld.cu)

Hospital de Baracoa, Guantánamo.

**Mabel Fonseca Cruz**

[mfonseca@UHO.edu.cu](mailto:mfonseca@UHO.edu.cu)

Universidad de Holguín.

**Ledennis Suárez Torres**

[lstorres@ismm.edu.cu](mailto:lstorres@ismm.edu.cu)

**Amable Severino Chirino Rodríguez**

**Tomás Fernández Columbié**

Universidad de Moa (Cuba)

**Resumen:** Se caracterizó microestructuralmente las transformaciones que ocurren en una fundición blanca hipoeutéctica de producción nacional en bruto de colada. Se analizaron tres muestras fundidas, a las cuales se les realizó ensayos metalográficos y dureza en el borde, entre el centro y borde y en el centro, para determinar el proceso de solidificación y la dureza en las mismas. Las microestructuras determinadas en cada una de las zonas de la pieza estuvieron precedidas por la presencia de la cementita, la perlita y la ledeburita, pero con diferencias en la formación del tamaño de los granos, lo cual está asociado al proceso de solidificación en el molde. En los perfiles de dureza realizados, esta propiedad varía de acuerdo a la zona analizada, 525 HV en el borde, 470 HV en el centro y 508 HV entre el borde y el centro.

**Palabras claves:** microestructura; fundición hipoeutéctica; ledeburita; bruto de colada.

## Microstructural characterization of a cast raw hypoeutectic white iron

**Abstract:** The objective of the work is to characterize microstructurally the transformations that occur in a hypoeutectic white foundry of national production in rough casting. Three molten samples were analyzed, to which metallographic tests and hardness were performed on the edge, between the center and the edge and in the center, to determine the solidification process and the hardness in them. The microstructures determined in each of the parts of the piece were preceded by the presence of cementite, perlite and ledeburite, but with differences in the formation of the size of the grains, which is associated with the solidification process in the mold. In the hardness profiles made, this property varies according to the area analyzed, 525 HV at the edge, 470 HV at the center and 508 HV between the edge and the center.

**Keywords:** microstructure; hypoeutectic cast iron; ledeburite, cast white.

## Introducción

En el proceso de fundición, el metal fundido fluye por gravedad u otra fuerza dentro de un molde donde se solidifica y toma la forma de la cavidad de este molde. El término fundición se aplica también a la parte resultante de este proceso. Es uno de los más antiguos procesos de formado que se remonta 6 000 años atrás. El principio de la fundición consiste en fundir el metal, vaciarlo en un molde y dejarlo enfriar (Celentano *et al.*, 2004 y Zhang *et al.*, 2010).

Dentro de los parámetros importantes en el proceso de fundición, está el calentamiento del metal. Ha sido expuesto por Sánchez-Figueroa (2013) que, en función del material que se va a fundir, de su calidad y del volumen por producir, se pueden utilizar diversos tipos de unidades de fusión (hornos), para calentar el metal a la temperatura necesaria. La energía calorífica requerida es la suma de: 1) el calor para elevar la temperatura hasta el punto de fusión, 2) calor de fusión para convertir el metal sólido a líquido y 3) el calor necesario elevar al metal fundido a la temperatura de vaciado.

La temperatura de vaciado del metal fundido después del calentamiento y una vez alcanzada la temperatura adecuada (mínima a la que se puede producir una pieza sana), el material está listo para verterse en el molde (Pina *et al.*, 2015), lo cual se refiere como vaciado. La introducción del metal en el molde y su flujo dentro del sistema de vaciado y de la cavidad es un paso crítico en el proceso. Para que el mismo tenga éxito, el metal debe fluir antes de solidificarse a través de todas las regiones del molde. Los factores que afectan la operación de vaciado son la temperatura de vaciado, la velocidad de vaciado y la turbulencia generada durante el llenado del molde.

## Particularidades de los hierros fundidos blancos

Los hierros fundidos son las aleaciones fundidas más utilizadas a nivel mundial. Los hierros blancos, en particular, son aleaciones de hierro, cromo y níquel. Se caracterizan por poseer una microestructura de austenita y ledeburita y carburos en la matriz. Según reporta la ASTM A532 (2014) y Wang *et al.* (2006), las altas temperaturas de colado agravan la contracción de solidificación y los puntos calientes generados, pueden producir micro rechupes y estructura dendrítica grosera, arrastre

de arena y, sinterización de la misma. Por lo tanto, es importante controlar la temperatura de colado en piezas con secciones gruesas.

La temperatura eutéctica para las aleaciones de Cr - Ni es de aproximadamente de 1 200 °C, comenzando la solidificación (fuera de equilibrio) entre 1 280 a 1 200 °C (estos valores dependen de la composición). La temperatura de colada es de 100 °C por sobre la línea de líquidus, debiendo ser mayores si se cuelean piezas finas. Estas aleaciones pueden ser coladas en arena, moldes permanentes, obteniendo la mayor dureza, resistencia y tenacidad al impacto, cuando se cuelean en coquilla, con respecto a las piezas coladas en arena debido a que los carburos son más finos, recomendándose que se acoquille la parte de la pieza que va a trabajar para aumentar la resistencia a la abrasión (Zhang, 2014).

Fernández-Pariente y Belzunce-Varela (2006) son del criterio que, estas aleaciones poseen una alta contracción líquido-sólido, alrededor del 5 %, por lo tanto, requiere un sistema de alimentación más grande que en las fundiciones de hierro gris. Se debe tener cuidado en el posicionamiento del sistema de alimentación para que sea fácilmente removible, los montantes no deben cortarse con soplete, debido a la fragilidad del metal y la mala conducción del calor haría que se fisure o rompa la pieza. Para evitar esto se debe cortar con discos abrasivos, siendo más fácil el corte, cuando la pieza alcanza la temperatura ambiente y toda su estructura es martensítica (la transformación martensítica comienza a los 230 °C).

Plantean Figueredo *et al.* (2013) que, la mayoría de las fundiciones de hierro se encuentran en una composición de carbono equivalente, debajo del 4,3 %; son de carácter hipoeutéctico. Las secuencias de fases durante la solidificación se pueden estudiar con la simplificación del diagrama ternario hierro-carbono-silicio tomadas en el 2 % de Si.

### **Llenado del molde con el metal líquido**

Varias relaciones gobiernan el flujo del metal líquido a través del sistema de vaciado y dentro del molde. Si se considera que el flujo es conservativo (lo cual no es verdad) se puede realizar un primer análisis, empleando para tal fin la ecuación de Bernoulli (ecuación de conservación de energía que parte de considerar que el flujo es laminar), la cual establece que la suma de las energías (altura, presión dinámica y energía

cinética) en dos puntos cualquiera de un líquido que fluye es igual (Jabbari & Hosseinzadeh, 2013).

Muchas piezas son elaboradas, vertiendo el metal líquido en las entradas del molde y llenándose este por la acción de la gravedad. Esta es la más simple y rápida forma de moldeo, aunque tiene mala repercusión en cuanto a calidad, debido a que tradicionalmente el sistema de llenado ha sido mal diseñado (Enrique, 2012).

Wen-qi *et al.* (2016) plantea que la razón más habitual que hace que un sistema de llenado sea incorrecto es la generación de turbulencia en el líquido. Esta generación produce en las piezas diversos defectos que hace que estas se desechen. También se producen múltiples defectos si el sistema de llenado permite la entrada de escoria (exterior o interior) o está mal dimensionado.

La capacidad del metal o la aleación de llenar la cavidad del molde depende de sus propiedades físicas: la viscosidad y la tensión superficial (Kermanpur *et al.*, 2008). Además, ejerce influencia sobre la fluidez el contenido de impurezas en el metal o aleación, la tendencia a la oxidación y la capacidad de extracción del calor del molde de fundición. Casi en todos los metales y aleaciones, cuanto mayor es la viscosidad, tanto menor es la fluidez.

En la resistencia durante el llenado, el metal líquido no fluye libremente por los conductos, está sometido a diferentes resistencias, provenientes de la interacción del metal líquido con las paredes de este. Estas interacciones se dividen en dos, la tensión superficial del líquido y el acabado superficial del molde (Kermanpur *et al.*, 2008).

El objetivo del trabajo es caracterizar microestructuralmente una fundición blanca hipoeutéctica del tipo ASTM A 531 de producción nacional en bruto de colada.

## **Desarrollo experimental**

### **Obtención de las probetas metálicas**

Para la obtención de las muestras se utilizó plantillas sueltas sin sistema de alimentación, que son las recomendadas para fabricar una sola pieza o una serie de pequeñas cantidades; se obtienen probetas y a partir de ellas se elaboran las muestras para realizar los análisis propuestos. En la figura 1 se muestran las probetas obtenidas.



Figura 1. Muestras obtenidas productos del moldeo.

Se realizó un desmoldeo rápido con el objetivo de eliminar las tensiones que surgen durante esta operación, es necesario tender a obtener la mínima cantidad de tensiones en la pieza. Las mismas son pocas a altas temperaturas, cuando las piezas se encuentran en la zona de deformación plástica. Al disminuir la temperatura y la aleación pasa al estado elástico, estas tensiones se agrupan y crecen hasta su máxima expresión en el momento del desmoldeo.

### Composición química de la fundición blanca

La determinación de los elementos aleantes presentes en la fundición se realizó en un espectrómetro cuántico de masa, ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón. En la tabla 1 se muestra la composición química obtenida.

Tabla 1. Composición química de la fundición blanca hipoeutéctica, % en masa

C	Si	Mn	P	S
2,76	1,19	0,56	0,10	0,05

En las fundiciones blancas hipoeutécticas, para que el carbono se mantenga en forma de carburo de hierro, este contenido de carbono y el silicio deben mantenerse relativamente bajos (esto es; 2,5-3 % de C y 0,5-1,5 % de Si), así como una elevada velocidad de solidificación.

### Comportamiento microestructural

Se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM – 100, dotado de una cámara instalada con el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe. Para observar las probetas, se nivelaron en un dispositivo con plastilina. Para la comparación de las microestructuras obtenidas de la fundición blanca hipoeutéctica en bruto de colada, se consideró una muestra de este tipo de aleación. La figura 2 se corresponde con la muestra de esta aleación.

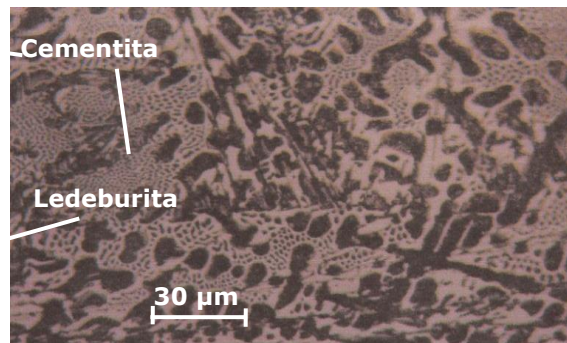


Figura 2. Fundición blanca sin tratamiento térmico.

En la microestructura de la fundición blanca en estudio y en estado de suministro, se observa la presencia de cementita primaria (zona clara) rodeada de perlita (zona oscura) y ledeburita (forma de piel de leopardo), característica de la fundición blanca hipoeutéctica. La mayor parte del carbono se halla, formando carburo de hierro o cementita y esta es la causa de que presenten una fractura blanca, es precisamente estos microconstituyentes lo que la hacen muy duras y poco dúctiles, no maquinables y con gran resistencia al desgaste y la abrasión.

Los carburos en los hierros de alto cromo son muy duros y resistentes al desgaste, pero son frágiles. La resistencia al desgaste se acrecienta por un incremento de la cantidad de carburos (incrementando el contenido de carbono), mientras que la tenacidad se alcanza por un aumento de la proporción de la matriz metálica (reduciendo el contenido de carbono). Su elevada respuesta deriva de su microestructura, compuesta de una alta fracción de volumen de carburos del tipo  $M_7C_3$  de Cr y Fe, tanto eutécticos como secundarios, en una matriz martensítica.

En las muestras fundidas se realizaron perfiles de dureza. Se efectuó un total de tres mediciones con una separación entre lectura de tres milímetros, además se promediaron dichos valores. En la tabla 2 se muestran las zonas consideradas para las mediciones.

Tabla 2. Zonas consideradas para las mediciones

Muestras	Borde	Centro	/centro y borde	Microestructura
1	HV1B	HV1B	HV1CB	-
2	HV2B	HV2B	HV2CB	-
3	HV3B	HV3B	HV3CB	-

En la figura 3 se muestra el procedimiento descrito en la tabla 2.

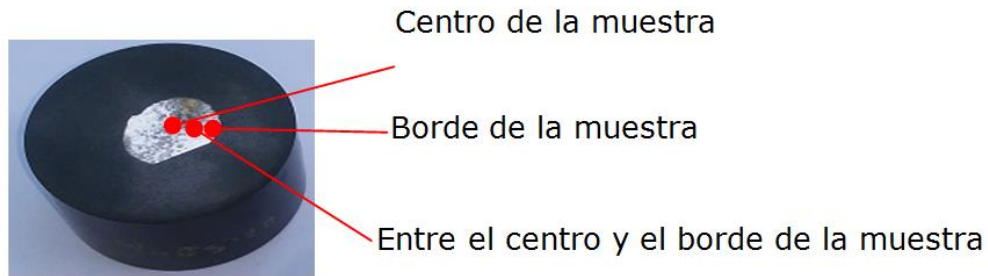


Figura 3. Zonas para la medición de dureza y el análisis microestructural.

Se realizó un barrido en toda la superficie con el objetivo de analizar la dureza y las microestructuras presentes. Se consideró el procedimiento, teniendo en cuenta que, la solidificación en las aleaciones hipoeutécticas ocurre por la formación de dendritas de austenita, seguidas por la formación de un eutéctico de austenita. Bajo condiciones de equilibrio precipitan carburos de cromo desde la matriz austenítica por encima de la temperatura de enfriamiento del eutéctico a la temperatura crítica, alrededor de 760 °C, donde ocurre la transformación de perlita y carburo en el subsiguiente enfriamiento. Sin embargo, cuando se enfría en condiciones de no equilibrio (caso que ocurre en las mayorías de las piezas convencionales) la austenita está sobre saturada de carbono y de cromo.

## Resultados y discusión

### Análisis del comportamiento microestructural en el centro de las muestras

Se efectuó el análisis microestructural de la fundición blanca hipoeutéctica según el procedimiento descrito. Se analizaron tres muestras de la fundición obtenida. La figura 4 (a) se corresponde con la muestra 1, la figura 4 (b) con la muestra 2 y la muestra 4 (c) con la muestra 3.

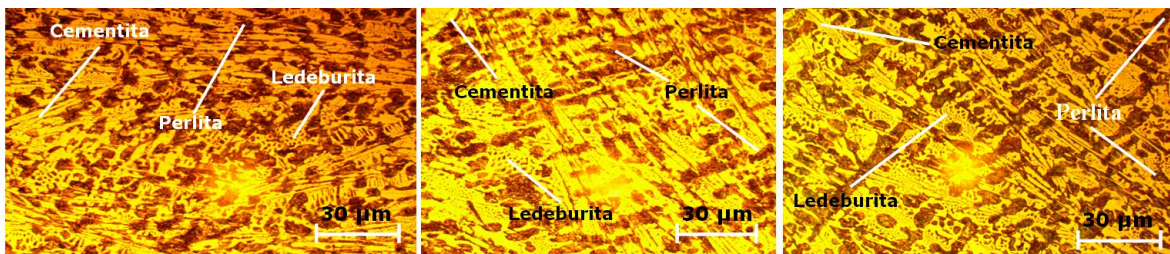


Figura 4 (a). Centro muestra 1 (b). Centro muestra 2. (c). Centro muestra 3.



Al analizar las estructuras obtenidas, se puede observar que, en la zona central de las muestras analizadas, todas presentan una formación estructural parecida, lo cual indica que, durante la solidificación en esta área se comportó de igual manera para cada una de ellas y que tienen correspondencia con la muestra patrón analizada. Se observa una estructura con presencia de cementita primaria (zona clara) rodeada de perlita (zona oscura) y ledeburita (forma de piel de leopardo), característica de la fundición blanca hipoeutéctica.

El carbono y el manganeso al reaccionar promueven la resistencia a la grafitización; por lo tanto, el contenido de manganeso retiene la microestructura perlítica, genera así las matrices perlíticas en las fundiciones de hierro. Estos microconstituyentes favorecen la formación de la dureza y permiten, en un tratamiento térmico, garantizar la elevación de esta propiedad, de acuerdo con Trepczyńska-Łent (2013).

Estos materiales requieren un complejo proceso de ajuste de sus propiedades, tanto por medio del agregado de componentes menores de aleación (Si), como por medio del procesamiento térmico, a fin de lograr la correcta respuesta de estos materiales bajo parámetros tribológicos de uso, en general, muy exigentes. La influencia del Si es determinante para la maleabilización de la fundición, ya que inhibe la formación de cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).

### **Análisis del comportamiento microestructural en el borde de las muestras**

Las estructuras de las figuras 5 (a), 5 (b) y 5 (c) se corresponden con el borde de las muestras, para las cuales se observan variaciones en las morfologías de los granos con respecto a las estructuras obtenidas en el centro de las muestras.

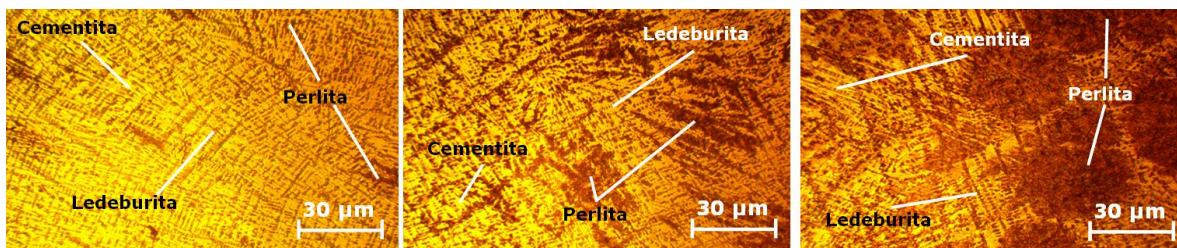


Figura 5 (a). Borde muestra 1. (b). Borde muestra 2. (c). Borde muestra 3.

En las estructuras, en estado bruto de colada, por el rápido proceso de enfriamiento, aunque se mantienen los mismos microconstituyentes, tienen un comportamiento diferente a la del centro. El mismo está ocasionado por el proceso de solidificación de

cada una de las fases, la cementita se ha formado con un comportamiento dendrítico, en dirección al molde y la perlita ha tenido diferentes formaciones en cada una de las muestras, comportándose en forma de colonias en la muestra número tres.

La formación de las dendritas desempeña un rol fundamental en el proceso de evolución microestructural. La dirección cristalográfica del crecimiento dendrítico es función de la estructura cristalina. En la aleación blanca, al ser la fase primaria pequeña, esta crece en forma de grandes cristales alargados donde está favorecida una de las direcciones de crecimiento. Durante la solidificación se obtiene una morfología dendrítica de grano más o menos fino que es función de la velocidad de enfriamiento, criterio que ha sido referido además por Trepczyńska-Łent (2013).

La ledeburita es definida como la estructura eutéctica establecida entre Fe/Fe<sub>3</sub>C. El término sirve para caracterizar las morfologías eutécticas. Las estructuras ledeburita generalmente se forman en un proceso de dos etapas. La primera etapa en la formación del hierro blanco fue el crecimiento de números de dendritas Fe<sub>3</sub>C, tal como en aleaciones eutécticas; sólo en estas aleaciones, las dendritas Fe<sub>3</sub>C crecen alrededor de las preexistentes dendritas de austenita. En esta etapa, la temperatura de transformación del liquidus fue a 1 040,6 °C; con la formación de la cementita a 1 152,3 °C, disminuyendo a 1 120,1 °C; para formar el eutéctico blanco, planteado también por Fernández-Columbié *et al.* (2016).

### **Análisis del comportamiento microestructural entre el centro y el borde**

A partir del sistema metal-molde y los tiempos totales de solidificación de la fundición blanca hipoeutéctica, se analizó las estructuras resultantes obtenidas, las cuales se ubican entre el borde y el centro de las muestras. La figura 6 (a), 6 (b) y 6 (c) se corresponden con esta área.

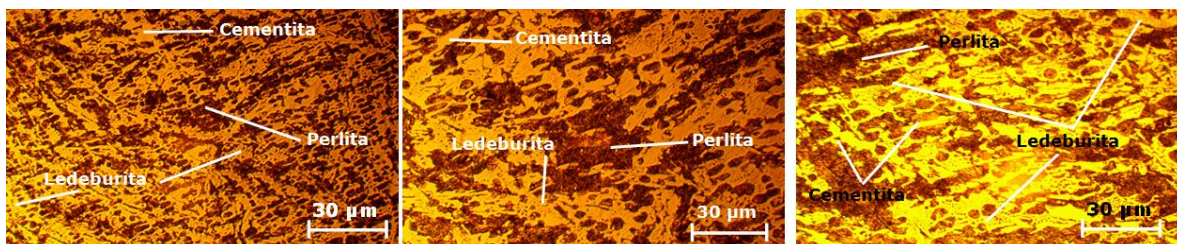


Figura 6 (a). Entre centro y borde muestra 1. (b). Entre centro y borde muestra 2. (c). Entre centro y borde muestra 3.

En esta zona de la fundición se observa en las microestructuras que, durante la transformación del líquido/sólido, existe un gradiente de temperatura más lento, lo cual induce a que en esta zona las fases no presenten una rápida solidificación. La cementita ocupa mayor distribución sobre la matriz, con la perlita, rodeando esta estructura. La ledeburita se ha formado en pequeñas colonias y distribuidas aleatoriamente.

La formación de esta microestructura ocurre según el diagrama hierro-carbono metaestable (Fe-Fe<sub>3</sub>C), con un enfriamiento moderado donde, del líquido se forman cristales de austenita y a 1 147°C, el líquido se transforma en cementita secundaria y ledeburita, entonces a esta temperatura existe austenita, cementita secundaria y ledeburita, a 723 °C la austenita se transforma en perlita. La estructura a esta temperatura está formada por perlita, cementita secundaria y ledeburita, manteniéndose hasta temperatura ambiente (Flórez *et al.*, 2010).

Las piezas de fundición enfriadas resultan con una superficie virtualmente libre de carbono grafitico, en virtud de que su composición es seleccionada de tal forma que, solo la superficie en contacto directo con el molde será la que esté libre del carbono grafitico. Las características más generales de esta fundición blanca es que, consiste en granos gruesos, orientado al azar, blanca en su totalidad y relativamente regular en su sección. La fundición blanca está libre de carbono grafitico, por ello su sección es totalmente blanca; esto en virtud de su composición química, parámetro mediante el cual también podría ser controlada su dureza, según consideraciones de Flórez *et al.* (2010).

### **Análisis de la dureza**

Se realizó el análisis según los procedimientos considerados anteriormente, centro, borde y entre centro y borde de las muestras. La tabla 3 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 3. Resultados de las durezas realizadas

Zona/muestra	1	2	3	Microestructura
Borde	524	526	526	Cementita + Perlita + Ledeburita
Centro	468	470	472	Cementita + Perlita + Ledeburita
÷ centro y borde	506	508	510	Cementita + Perlita + Ledeburita

Se observa variación de la dureza según los microconstituyentes obtenidos, en la medida que se realizó el barrido, en el borde existe una dureza de 525 HV, disminuye hasta un valor promedio de 470 HV en el centro y de 508 HV entre el borde y el centro. Los cambios ocurridos en las variaciones, presumiblemente estén asociados a las bruscas transformaciones de calentamiento y enfriamiento, al contenido de los elementos de aleación, el carbono en primer lugar, luego al manganeso, lo que ha sido planteado también por Bedolla-Jacuinde *et al.* (2003).

La dureza de 525 HV la proporciona los carburos disueltos o la cementita secundaria que contiene en su estructura, en una matriz perlítica, lo que demuestra que este microconstituyente, garantiza la elevación de esta propiedad mecánica y la resistencia al desgaste, según Zhang *et al.* (2014).

### **Conclusiones**

Las microestructuras obtenidas en la fundición blanca hipoeutéctica en las diferentes zonas están compuestas por las fases Cementita + Perlita + Ledeburita, sin embargo, producto del proceso de solidificación, las mismas no mantienen el mismo comportamiento sobre la matriz.

Las microestructuras del centro presentan una formación estructural con tendencia similar a la muestra patrón, no siendo así la del borde, lo cual está asociado al proceso de enfriamiento, donde en la primera zona se realiza de forma más lenta.

Al determinar la dureza en cada una de las zonas se observó que, en el borde existe una dureza de 525 HV, con disminución hasta 470 HV en el centro y de 508 HV entre el borde y el centro, asociado a los bruscos cambios de calentamiento y enfriamiento.

### **Referencias bibliográficas**

ASTM A532-14. 2014. Standard Specification for Abrasion-Resistant Cast Irons.

BEDOLLA-JACUINDE, A.; ARIAS, L. & HERNÁNDEZ, B. 2003. Kinetics of Secondary Carbides Precipitation in a High-Chromium White Iron Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 12 (4): 371-382.

- CELENTANO, D.; SCHULZ, B. & CRUCHAGA, M. 2004. Análisis termofluidodinámico-microestructural de proceso de solidificación de fundiciones grises. *Revista Materia*. 9 (2): 73-79.
- ENRIQUE, F. 2012. *Manual del fundidor*. Editorial Científico-Técnica. Ciudad Habana. 143 p.
- FERNÁNDEZ-PARIENTE, I. & BELZUNCE-VARELA, F. 2006. Influencia de diversos tratamientos térmicos en la microestructura de una fundición blanca con alto contenido en cromo. *Revista de Metalurgia*, 42 (4): 279-286.
- FERNÁNDEZ-COLUMBIÉ, T.; DUEÑAS-RODRÍGUEZ, G.; MARIÑO-PÉREZ, A.; VELÁZQUEZ-DEL ROSARIO, A. & ALCÁNTARA-BORGES, D. 2016. Modificación de las propiedades de la fundición blanca ИЧХ2Н4 con tres variantes de temple. *Minería y Geología*. 32 (4): 110-123.
- FIGUEREDO, Y.; PALACIOS, A.; VELÁZQUEZ, A. & GARCÍA, E. 2013. El recocido de esferoidización como vía para mejorar la maquinabilidad de la aleación ИЧХ28Н2. *Minería y Geología* 29 (1): 60-76.
- FLÓREZ, O.; CASTAÑO, R. & FABIÁN, O. 2010. Comportamiento microestructural de una fundición blanca al alto cromo sometida a ciclos de tratamientos térmicos. *Scientia et Technica*. XVI (45): 43-48.
- JABBARI, M. & HOSSEINZADEH, A. 2013. Numerical modeling of coupled heat transfer and phase transformation for solidification of the gray cast iron. *Computational Materials Science*, 68:160-165.
- KERMANPUR, A., MAHMOUDI, S. & HAJIPOUR, A. 2008. Numerical Simulation of Metal Flow and Solidification in the Multi-cavity Casting Moulds of Automotive Components. *Journal of Materials Processing Technology*, 206 (1-3): 62-68.
- PINA, J.; KOUZNETSOVA, V. & GEERS, M. 2015. Thermo mechanical analyses of heterogeneous materials with a strongly anisotropic phase: the case of cast iron. *International Journal of Solids and Structures*. 63 (5): 153-166.

- SÁNCHEZ-FIGUEREDO, R.; OVIEDO-FIERRO, F. & CÁRDENAS, V. 2013. Obtención de fundidos metálicos por el método de vertido dinámico, en VI Conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín, Holguín, Cuba.
- TREPCZYŃSKA-ŁENT, M. 2013. Directional Solidification of ledeburite. Archives of Foundry Engineering. 13 (3): 1 0 1 - 1 0 6.
- WANG, J.; LI, C.; LIU, H.; YANG, H.; SHEN, B.; GAO, S. & HUANG, S. 2006. The precipitation and transformation of secondary carbides in a high chromium cast iron. Materials Characterization. 56 (13): 73-78.
- WEN-QI, Z.; ZHI-GUO, Z.; HAO, Y. & WEI, L. 2016. Effect of vibration frequency on microstructure and performance of high chromium cast iron prepared by lost foam casting. China Foundry. 13 (4): 248-255.
- ZHANG, W.; SONG, D.; ZHANG, H.; LI, D.; YUAN, X. & QIU, K. 2010. Microstructures and formation mechanism of hypoeutectic white cast iron by isothermal electromagnetic rheocast process. Research & Development. 7 (2): 113-116.
- ZHANG, Z.; CHENGKAI, YANG.; PENG, Z. & WEI, L. 2014. Microstructure and wear resistance of high chromium cast iron containing niobium. Research & Development. 11 (3): 1-10.