

Fundición X28H2 en bruto de colada empleada en la fabricación de impelentes de bombas Warman*

Alejandro Mendoza Abad

Especialidad: Mecánica

Instituto Superior Minero Metalúrgico (Cuba).

Resumen: Se caracterizó la fundición blanca del tipo X28H2 que se fabrica en la Empresa Mecánica del Níquel de Moa. La fundición de dicha aleación se realizó en un horno de inducción de alta frecuencia; la carga seleccionada fue a partir de chatarra, palanquilla, níquel sinterizado, ferrocromo, ferrosilico, ferromanganeso y carbón antracita. Mediante el análisis microestructural se determinó que la fundición está compuesta por carburos de cromo del tipo Cr_7C_3 y $Cr_{23}C_6$ eutécticos, austenita eutéctica y dendrítica en estado de suministro, así como la martensita. La dureza determinada está en correspondencia del porcentaje de microconstituyentes, la cual es de 67,7 HRC.

Palabras clave: Fundición; análisis microestructural; carburo de cromo; aleación de hierro.

* Trabajo tutorado por el Dr. Tomás Fernández Columbié.
Recibido: 24 agosto 2018/ Aceptado: 28 febrero 2019.

X28H2 casting in pig iron used in manufacturing Warman pump impellers

Abstract: White cast iron type X28H2 was characterized, which is manufactured at Mecánica Del Níquel enterprise of Moa municipality. The casting was carried out in a high frequency induction furnace; the selected load came from scrap, billets, sintered nickel, ferrochrome, ferrosilicon, and ferromanganese and anthracite coal. By means of the microstructural analysis, it was determined that the casting is composed of chromium carbides of the eutectic type Cr_7C_3 and Cr_{23}C_6 , eutectic and dendritic austenite in supplying state, as well as the martensite. The determined hardness corresponds to the percentage of microconstituents, which is 67,7 HRC.

Key words: casting; microstructural analysis; chromium carbide; iron alloy.

Introducción

Los equipos mineros son diseñados con tecnologías modernas, aunque en la medida en que aumenta el número de horas de explotación envejecen, por lo que sufren averías por diversas causas, generando paros operacionales imprevistos. Por esta razón son sometidos a reparaciones fuera de pronósticos, que ocasionan aumento en los costos usuales de operación por concepto de mantenimiento. Esto trae consigo la disminución de los indicadores técnico-productivos.

Las empresas cubanas se interesan por incrementar la calidad en los productos y por realizar un amplio estudio en la preparación, ejecución y venta de las producciones. Todo esto con el objetivo de aprovechar al máximo cada proceso, elaborando mercancías que sean capaces de competir al más alto nivel en un mercado cada vez más globalizado.

En la Empresa Mecánica del Níquel de Moa se fabrican gran variedad de piezas. Dentro de las aleaciones que se funden en la mencionada entidad moense está el hierro blanco de tipo X28H2, empleado en la fabricación de impelentes de bombas Warman 6/4. Se conoce que esta aleación posee importantes propiedades mecánicas, pero el producto logrado en la entidad antes mencionada no se ha evaluado desde el punto de vista metalúrgico.

Este trabajo propone analizar las propiedades metalúrgicas de la aleación de hierro fundido X28H2, fundida en la Empresa Mecánica del Níquel de Moa.

Materiales y métodos

La fusión de la aleación se realizó en un horno de inducción con crisol de alta frecuencia, con capacidad de 1 t. La temperatura de fusión de la aleación metálica fue de 1 550 °C y la temperatura de vertido 1 600 °C.

Para la distribución de la composición química del producto se seleccionaron materiales como el arrabio, FeMn, Fe Cr, Ni-Sinter, palanquilla y carbón antrasita. Se comprobó que los mismos estuviesen limpios de grasa y suciedad, teniendo un tamaño tal que no dañen el revestimiento del horno. El proceso de pesaje se realizó en una balanza digital de pesaje industrial.

Las altas temperaturas de colada agravan los problemas de contracción, micro rechupes y estructura dendrítica grosera. Es importante el control de la temperatura de colada si las secciones de las piezas son groseras, debiéndose colar a bajas temperaturas para evitar los problemas de la contracción líquida (rechupes), penetración del metal en el molde y sinterización de la arena.

Las bajas temperaturas de colada son efectivas para el control del tamaño de las dendritas. Las piezas con un espesor de 102 mm son cargadas desde 1 345 °C hasta 1 400 °C. Se utilizan mayores temperaturas si las piezas presentan menor espesor, donde se tiene presente la configuración de las piezas al seleccionar la temperatura de colada.

Con el objetivo de obtener las probetas con la calidad posible se realizó proceso manual de moldeo, empleando mezclas de resina furánica autofraguante. Este producto de arena que endurece en poco tiempo, una vez vertido dentro de la caja de moldeo, responde a los requerimientos del proceso tecnológico como permeabilidad, resistencia, penetrabilidad al gas, el poder gasógeno e higroscopicidad.

Se realizó la limpieza de las probetas, empleando la máquina granalladora V+S-Funker, tipo FBS 2,2 x 2,7 x 3,30 m, de fabricación alemana por la firma de V + S Vogel & Schemmann Maschin GmbH Schwerter Str. 2000.

Obtención de las probetas metálicas

La probeta metálica se obtiene mediante el vertido del metal líquido en un molde previamente confeccionado a partir de una plantilla de madera. Luego del vertido, la aleación se solidifica y da lugar a la misma.

Es importante que las molduras tengan la menor cantidad de tensiones posibles. Esto se logra a través de la correcta temperatura de fusión, luego de que los elementos sobrepasan 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.

Las tensiones de fase aparecen en el momento de cambios alotrópicos o de fases cuando la nueva fase y la anterior se diferencian en volumen específico a la temperatura de deformación elástica.

Composición química según las normas ASTM y SAE

De acuerdo con las normas americanas *American Society for Testing Materials* (ASTM) y la *Society of Automotive Engineers* (SAE), la composición química estándar de esta aleación es la que se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química del hierro blanco X28H2 según normas AISI-SAE

Carbono	Silicio	Manganeso	Cromo	Molibdeno	Níquel	Hierro
2-3 %	1,5 % máx	2 % máx	23-30 %	3 % máx	2,5 % máx	Balance

Según la composición química mostrada en la Tabla 1 y las normas relacionadas se corresponde con un hierro blanco, denominado por la norma DIN como hierro X28H2, cuyos elementos fundamentales son el cromo, el níquel y el carbono.

Los hierros blancos con elevado cromo tienen una excelente resistencia a la abrasión y son usados efectivamente en bombas centrífugas, también se emplean en la molienda y trituración de minerales. En algunas aplicaciones de este tipo de hierro las piezas deben soportar cargas de impacto. Son reconocidos, además, como los de mayor combinación entre dureza y resistencia a la abrasión.

Influencia de los elementos componentes de hierro

Una de las ventajas del elemento níquel es evitar el crecimiento del grano en los tratamientos térmicos, lo que sirve para producir en ellos gran tenacidad. Hace descender los puntos críticos y por ello los tratamientos pueden hacerse a temperaturas ligeramente más bajas que la que corresponde a los hierros blancos. Experimentalmente se observa que con los hierros blancos con níquel se obtiene, para una misma dureza, un límite de elasticidad levemente más elevado y mayores alargamientos y resistencias que con los aceros al carbono o de baja aleación.

Los hierros con cromo de mayor utilidad son los hierros blancos, de gran resistencia mecánica con aproximadamente 28 % de cromo y de 0,50 % a 2,963 % de carbono, aleados según los casos, con níquel y cromo para piezas de gran espesor, con resistencias variables de 700 MPa a 1 500 MPa.

El molibdeno mejora notablemente la resistencia a la tracción, la templabilidad y la resistencia al creep de los hierros blancos. Añadiendo solo pequeñas cantidades de molibdeno, se disminuye o elimina casi completamente la fragilidad, que se presenta

cuando estos hierros son revenidos en la zona de 450 °C a 550 °C. Mejora también la resistencia de estos en caliente y reemplaza al wolframio en la fabricación de los aceros rápidos, pudiéndose emplear para las mismas aplicaciones aproximadamente una parte de molibdeno por cada dos de wolframio.

El molibdeno se disuelve en la ferrita, pero tiene una fuerte tendencia a formar carburos. Es un potente estabilizador de los carburos complejos y tiende a retardar el ablandamiento de los hierros, durante el revenido.

Obtención de la cantidad de elementos en la aleación

Obtención del contenido de manganeso

En las fundiciones el contenido de manganeso se modifica en función de la matriz deseada. Esta puede ser tan baja como 0,1 % para hierros ferríticos y tan alta como 1,2 % para hierros perlíticos, ya que el manganeso es un fuerte promotor de la perlita (Belzunce, 2001).

La relación entre el manganeso y el azufre, para una estructura libre de sulfuro de azufre y máxima cantidad de ferrita, se obtiene por la expresión 1.

$$\%Mn = 1,7 \cdot (\%S) + 0,15 \quad (1)$$

La cantidad de manganeso en la fundición puede modificar la microestructura del carbono porque incide sobre su proceso de crecimiento. La presencia de manganeso promueve la resistencia a la grafitización; por lo tanto, el contenido de manganeso necesario para reaccionar con azufre sirve para retener microestructuras perlíticas y genera así las matrices perlíticas en las fundiciones de hierro.

Carbono equivalente en función del carbono, el silicio y el fósforo

El porcentaje de carbono equivalente de la fundición se obtiene por la ecuación 2 (Dardati *et al.*, 2002).

$$\%C_{eq} = \%C + \frac{(\%Si + \%P)}{3} \quad (2)$$

El cálculo del carbono equivalente permite evaluar el efecto de la composición de los elementos en las fundiciones. Permite estimar si una específica fundición será hipo o hipereutéctica durante la solidificación.

Obtención de la cantidad de carbono y silicio

Con el fin de lograr la cantidad de C y Si en la fundición se emplean las curvas de enfriamiento. El contenido de estos elementos en una fundición solidificada metaestablemente puede calcularse en función de los valores de temperatura de transformación eutéctica, de la temperatura de arresto de líquidus (T_{AL}) y según las expresiones de cálculo 3, 4 y 5, aportadas por Dardati y demás colaboradores (2004).

$$Si \left[\% = \frac{2085,4 - C_{ET}}{22,7} \right] \quad (3)$$

$$C[\%] = \frac{(2994 - T_{AL} - 53,07 \cdot \%Si)}{212,3} \quad (4)$$

$$T_{AL} = 1569 - 97,3 \left(C + \frac{1}{4} Si \right) \quad (5)$$

C_{ET} es el carbono equivalente total, expresado en porcentaje y T_{AL} es la temperatura de líquidos de la austenita, en grados Celsius.

Cálculo del carbono equivalente

Con el empleo del carbono equivalente se puede normalizar la composición química de un acero en un solo número, para indicar cómo influye en su templabilidad. Una de las formas de mayor uso se expone a continuación en la expresión 6.

$$C_{eq} = C\% + \frac{Mn\%}{6} + \left(\frac{Cr\% + Mo\% + V\%}{5} \right) + \frac{Ni\% + Cu\%}{15} \quad (6)$$

Según la composición química del hierro se determina su templabilidad, donde el contenido de carbono es el que más afecta esta propiedad. Otros elementos químicos ejercen influencia, como el manganeso, el cromo, el vanadio, aunque en menor escala.

Composición de las interfaces

Para poder especificar las composiciones de equilibrio de las distintas fases en las zonas de interface se tiene en cuenta la influencia del silicio a partir del diagrama de equilibrio ternario Fe-C-Si. Esto se logra con el uso de este diagrama en dos dimensiones, pero cuyas líneas de líquidos, sólidos y temperatura de equilibrio eutéctica están definidas por funciones que dependen de los contenidos de silicio (Si) y de carbono (C) en la fundición que solidifica. La composición en las interfaces se determina por las expresiones de cálculo 7, 8 y 9 como sigue.

$$T_{AS} = 1528 - 177,9(C + 0,18 \cdot Si) \tag{7}$$

$$T_E = 1154,6 + 6,5 \cdot Si \tag{8}$$

$$T_{GL} = 389,1 \left(C + \frac{1}{3} Si \right) - 503,2 \tag{9}$$

Se tiene que T_{AS} es la temperatura de sólidos de la austenita y T_E es la temperatura eutéctica, ambas expresadas en grados Celsius (Figura 1).

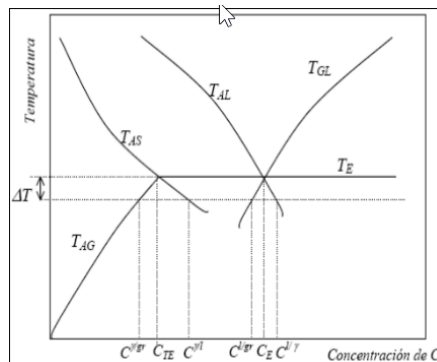


Figura 1. Región eutéctica del diagrama Fe-C-Si para un determinado porcentaje de Si.

El significado de las temperaturas T_{AL} , T_{AS} , T_E y T_{GL} (temperatura de líquidos del grafito) puede observarse en la anterior figura que se corresponde con un sector del diagrama de equilibrio Fe-C-Si para un determinado porcentaje de silicio.

Por intersección entre AS T y E T se obtiene el punto de máxima solubilidad de carbono en la austenita a temperatura eutéctica, lo cual se representa por la expresión 10.

$$C_{TE} = 0,8 - 0,216 \cdot Si \tag{10}$$

De las ecuaciones anteriores se procede a despejar los porcentajes de carbono en la zona de la interfase correspondientes a cada fase y temperatura. En todos los casos, las concentraciones de equilibrio de carbono en las interfaces se obtienen mediante las expresiones de cálculo establecidas por Boeri en 1989 (ecuaciones 11 y 12).

$$C^{l/\gamma} = \frac{1}{9,73} (1569 - T - 24,32 \cdot Si) \quad (11)$$

$$C^{\gamma/l} = \frac{1}{117,9} (1528,4 - T - 32 \cdot Si) \quad (12)$$

De aquí se conoce que T es la temperatura en °C, $C^{l/\gamma}$ es la concentración de carbono del líquido en contacto con la austenita $C^{\gamma/l}$ es la concentración de carbono de la austenita en contacto con el líquido y $C^{l/gr}$ Concentración de carbono del líquido en contacto con el grafito.

Preparación de las muestras

La metalografía microscópica estudia las características estructurales y de constitución de los productos metalúrgicos con la ayuda del microscopio metalográfico, para relacionarlos con sus propiedades físicas y mecánicas. La preparación defectuosa de las probetas puede introducir defectos por deformaciones, rayas, arranques de material, elementos extraños, bordes redondeados o daños térmicos.

Se realizaron varias operaciones para obtener las propiedades de la fundición blanca X28H2, las cuales se resumen en el orden siguiente (NC 10-56:86 y ASTM E3-95, 2001):

1. Corte de la muestra
2. Desbaste y pulido
3. Montaje y preparación de la probeta
4. Ensayo de dureza
5. Obtención de micrografías
6. Obtención del porcentaje de microconstituyentes.

Las muestras fueron pulidas en una pulidora metalográfica marca PM 52 D. La fabricación de la pulidora es del 2015 con un número de serie 201500001946, de procedencia italiana, llevada el mercado internacional por la firma echoLAB. Cuenta

con dos platos y un soporte para múltiples muestras, la cual fue diseñada para la preparación de las probetas metalográficas, utilizando como material de trabajo lijas de variadas granulometrías para el desbaste de las probetas y paños utilizados en el pulido o acabado de las probetas metalográficas.

Para el acabado final se empleó un paño de fieltro grueso, se usó como sustancia abrasiva el óxido de cromo. Una vez pulida se lavaron con agua destilada, secándose con papel de filtro. Se volvieron a lavar con tetracloruro de carbono (Cl_4C) para evitar cualquier vestigio de grasa y pastas de pulir; se empleó la técnica de ataque químico.

Encapsulado de las muestras para la observación microestructural

Antes de las operaciones de desbaste y pulido es necesario montar las muestras en un soporte encapsulado, que garantice estabilidad durante los ensayos. Esta operación se realiza por medio de una máquina de encapsular de marca echo RD, de tipo MP 350 A. Se emplea resina fenólica negra con una temperatura de fusión de 150-170 °C, durante un tiempo de 6-8 minutos, para luego enfriarse en el molde hasta los 60 °C.

Ataque químico empleado

El ataque químico se realiza empleando técnica manual por inmersión durante quince segundos aproximadamente. Las probetas pulidas se lavan con agua destilada y se secan con papel de fieltro. Luego se vuelven a lavar con etanol para eliminar todo residuo de grasa. El reactivo utilizado es el nital, con 5 ml de ácido nítrico y 95 ml de alcohol etílico. Esta sustancia oscurece la perlita y da contraste entre sus colonias, por lo que revela sus fronteras, además diferencia la ferrita de la martensita y aumenta la rapidez del ataque.

Después de atacadas las muestras se lavan con agua destilada, se sumergen en alcohol etílico durante unos segundos y finalmente se secan, lo que elimina las impurezas y la humedad.

Observación microestructural

El examen metalográfico se realizó a través de un microscopio óptico binocular, marca echoLAB, empleando aumento de 200X, dotado de una cámara instalada mediante el hardware que refleja la imagen metalográfica.

El examen microscópico aportó información sobre la constitución del material. La microestructura refleja la historia del tratamiento mecánico que ha sufrido el metal.

El análisis microestructural consistió en la observación de una muestra patrón del hierro fundido X28H2.

Se empleó una muestra patrón de la aleación para establecer similitudes entre esta y la estructura interna obtenida en el ensayo, después de haber alcanzado la fundición. La Figura 2 se corresponde con la muestra patrón del hierro fundido.

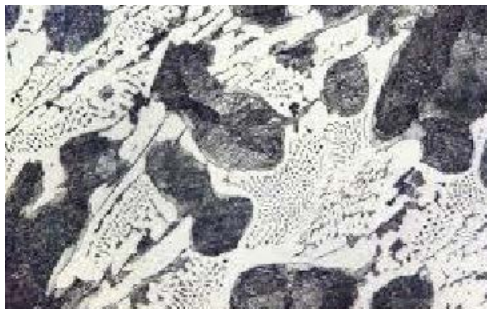


Figura 2. Muestra patrón de la fundición blanca.

Obtención del porcentaje de microconstituyentes

El porcentaje de microconstituyentes se determinó a partir de un hardware instalado al microscopio óptico. Este tipo de microscopio funciona por medio de la combinación entre el sistema óptico y la iluminación. En este ensayo los granos van a presentar colores diferentes, lo que indica que poseen una estructura interna diferente.

Los átomos en los límites de grano son más reactivos durante el ataque químico y se disuelven en mayor cantidad que el grano mismo, por ello la reflexividad cambia y se acrecienta su visibilidad.

Evaluación de las propiedades mecánicas

Es de suma importancia cuando se estudian aleaciones metálicas emplear métodos de evaluación que permitan conocer físicamente y en breve tiempo algunas de las características más importantes de las aleaciones. Los métodos de ensayos no destructivos de dureza y microdureza son ideales para estimar comportamientos mecánicos en las aleaciones (Gresesqui, Rodríguez & Fernández, 2017).

Ensayos de dureza a la aleación X28H2

Por medio de este método se obtienen, en piezas ya elaboradas, características mecánicas importantes en forma rápida.

La selección de cada uno de los niveles está determinada por el mayor o menor grado de tolerancia que se quiere calcular en el material, o lo que es lo mismo, por la mayor o menor homogeneidad en la estructura.

Los ensayos de dureza se realizaron en cinco puntos de la cara superficial de la probeta, con el empleo de un durómetro digital modelo HRS-ISO (*Digital Rockwell Hardness Tester*). Este se ubica en el Laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMMM y está especialmente diseñado para medir dureza superficial en aleaciones metálicas. Utiliza como penetrador un cono de diamante con un ángulo de 136° y expresa la dureza en HRC. La carga aplicada es de 1 471 N en un tiempo de quince segundos. La superficie de la probeta se preparó de la misma manera que para el análisis microestructural (desbaste y pulido), para lograr que esta quede en posición horizontal y evitar desplazamientos del indentador y, por tanto, resultados erróneos.

Cuando se conocen los valores de la dureza obtenidos en cada una de las mediciones se calcula el promedio (Media) de estas de forma individual, a través de la expresión 13, estando al tanto de la cantidad de huellas realizadas en el experimento.

$$Media = \frac{\sum X_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n HRC_i}{n} \quad (13)$$

Aquí, X_i es el valor de i medición; HRC representa el valor de dureza en kgf/mm^2 y n el número de mediciones realizadas.

Luego se realizó la conversión de los resultados promedios obtenidos en HRC en otra escala de conversión (HV).

Análisis de la composición química del X28H2

Se estableció la relación entre el manganeso y azufre, según la ecuación 1, donde se consideró el porcentaje de azufre, de lo que se obtuvo que el porcentaje de manganeso es de 0,81%, para una estructura libre de sulfuro de azufre y máxima cantidad de ferrita. Para obtener una estructura perlítica se debe agregar manganeso

durante el ciclo regular para retener carbono combinado por toda la matriz o se puede variar la segunda etapa del proceso, es decir, se varía la velocidad de enfriamiento a partir de la temperatura de 760 °C.

El contenido de carbono equivalente en función del carbono, el silicio y el fósforo se calculó por la ecuación 2, donde para 2,962 % de carbono; 1,067 % de silicio y un 0,046 % de fósforo, el contenido total de carbono equivalente es de 3,34 %.

Según el resultado se plantea que, en relación a los tres elementos analizados, la fundición blanca X28H2 mantiene la condición de una aleación hipoeutéctica.

Se calculó el contenido de carbono y silicio en la fundición, a partir de un carbono equivalente total de 3,4 %, por lo que la cantidad de silicio calculado por la ecuación 3 es de 0,91 %. Se calculó el contenido de carbono en función de la temperatura de arresto del líquido de la austenita con un valor de 1 254,85 °C, según la ecuación 5, por lo que, el porcentaje de carbono en adecuación a la ecuación 4 es de 7,93 %.

Según los elementos que se relacionan en la ecuación 6 el carbono equivalente de la fundición es de 3,4 %, que la caracteriza como una aleación hipoeutéctica, donde su solidificación comienza con la formación de dendritas de austenita primaria transformada en perlita y ledeburita transformada (Fernández y Belzunce, 2006).

Para un punto de fusión de la fundición blanca que se encuentra entre los 1 500-1 600 °C y una temperatura de arresto del líquido de la austenita con un valor de 1 254,85 °C, desde el estado líquido, se forman cristales de austenita que disuelven el carbono hasta llegar a la temperatura eutéctica, en donde el líquido remanente reacciona para formar el eutéctico martensita y cementita, criterio expuesto por Rivera, Boeri & Sikora (2000).

La composición en las interfaces se calculó por la ecuación 7, la temperatura de sólidos de la austenita T_{AS} con un valor de 966,89 °C y mediante la ecuación 8 la temperatura eutéctica T_E con un valor de 1 161,54 °C. De igual modo en la ecuación 9 se calculó la temperatura de líquidus del grafito (T_{GL}) con un valor de 787,70 °C.

La máxima solubilidad de carbono en la austenita a temperatura eutéctica, en correspondencia con el carbono total en la eutéctica, se determinó por la ecuación 10, donde para un contenido de silicio de 1,067 % este contenido es de 0,57 %.

Para la determinación de los porcentajes de carbono se consideró una temperatura de fusión de 1 550 °C. Según la ecuación 11 la concentración de carbono del líquido en contacto con la austenita $C^{l/\gamma}$ es 0,18 % y la concentración de carbono de la austenita en contacto con el líquido $C^{l/\gamma}$ es de 0,19 %, según la ecuación 12. Mediante los cálculos realizados en la ecuación 13 se determinó la dureza promedio y la misma es de 67,7 HRC.

Realizados los cálculos de las diferentes concentraciones de carbono se puede verificar que la fundición blanca X28H2 presenta una solidificación hipoeutéctica.

Análisis microestructural del X28H2

En la Figura 3 se observa la estructura interna de una muestra de X28H2.

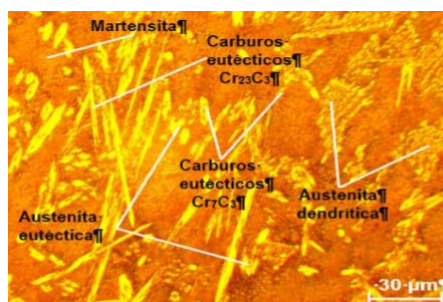


Figura 3. Microestructura de la aleación en bruto de colada.

En las estructuras, en estado bruto de colada, se observa la presencia de carburos de cromo del tipo Cr₇C₃ y Cr₂₃C₆ eutécticos y austenita eutéctica en estado de suministro, comportamiento propio de una fundición hipoeutéctica, así como la martensita, siendo menor la fracción volumétrica de austenita retenida.

El carburo Cr₂₃C₆ puede precipitarse durante el enfriamiento o calentamiento en el rango de temperaturas entre 500 °C y 850 °C. Generalmente se realiza un tratamiento de recocido para disolver los carburos a altas temperaturas (mayor de 1 050 °C), debido a que el carburo es soluble en austenita a altas temperaturas. Su composición es variable y están compuestos principalmente entre el 9 % y el 30 % de cromo y de 1 % a 2 % de carbono. Presenta una estructura cúbica centrada en las caras.

El carburo Cr₇C₃ es una fase menor y no existe ninguna mención sobre la inestabilidad del Cr₂₃C₆ con respecto a este tipo de carburo; se reporta que el Cr₂₃C₆ permanece como el principal carburo en estructuras austeníticas, incluso después de largos

tiempos de permanencia. El Cr_7C_3 es resistente a la disolución a elevadas temperaturas y se pueden formar durante un tratamiento posterior a la solidificación; presenta una estructura hexagonal (Liu *et al.*, 2007).

Es una fundición blanca de la denominada tipo hipoeutécticas, que se utilizan frente al desgaste; estructuralmente está caracterizada por la presencia de cementita en proporciones, en correspondencia con el contenido de carbono (2,76 %), lo que da lugar a que su dureza sea alta y consecuentemente también su fragilidad, lo que crece con este contenido, al tiempo que disminuye su resistencia a tracción. Debido a su gran fragilidad es por lo que presenta características para la fabricación de las volutas de las bombas centrífugas.

Los resultados de desgaste están muy influidos por la rugosidad superficial, por lo que es preciso realizar una preparación previa superficial con el objetivo de uniformar el acabado superficial de las fundiciones y minimizar su influencia, lo que ha sido expuesto por Lee, Lee & Lee (2006).

Con esta aleación se pueden producir bolas para pulverizar minerales, con buena resistencia al impacto, a la fatiga, con costos bajos y se eleva la vida de servicio de dos a cinco veces el porcentaje de las bolas obtenidas con un hierro de elevado contenido de cromo y medio contenido de manganeso. Pero el proceso de desulfuración y el costo de los inoculantes para obtener el hierro esferoidal, así como el equipamiento necesario para su inoculación no resultan tan baratos (Yuanzhong y Maorang 1998).

Análisis del porcentaje de microconstituyentes

Los granos que se observan al microscopio como microcomponentes del acero pueden pertenecer a algunas de las fases, o mezcla de fases, que están presentes en todo acero. Los granos, a su vez, están formados por agregados de cristales. Son estos cristales los que van a determinar en gran medida las propiedades del acero. En algunos casos, especialmente en materiales aleados, aparecerán otras fases, como carburos y nitruros, que otorgarán favorable o desfavorablemente, propiedades diferenciadas a ese tipo de aleación. El porcentaje de microconstituyentes en la probeta en bruto de colada, con sus respectivos datos de las fases, se muestran en la Tabla 2; los cuales están en correspondencia con el análisis microestructural realizado.

Tabla 2. Datos de las fases de los microconstituyentes para la muestra

Microconstituyentes	Área μm^2	Área (%)
Carburos	206 868	24,58
Austenita	523 823	62,23
Martensita	111 037	13,19

Se observa el porcentaje de microconstituyentes presentes en la microestructura de la probeta en bruto de colada. Las tres fases proporcionan dureza a la fundición, siendo los carburos de cromo (24,58 %) y la martensita (13,19 %) las que más aportan esta propiedad mecánica.

Análisis de la dureza

La dureza del material está correlacionada con el grado de abrasión, lo cual está asociado a la dependencia de la resistencia a la abrasión, composición química, dureza y microestructura de una fundición blanca del tipo X28H2.

En la Tabla 3 se muestran valores de dureza en las muestras obtenidas. Se obtuvieron elevados valores de dureza muy similares, lo que revela la efectividad del calentamiento y el medio de enfriamiento empleado para la obtención de la microestructura deseada.

Tabla 3. Valores de dureza en las muestras obtenidas

Mediciones	Valor de dureza (HRC)	Coverción (HV)
1	66,9	897
2	70,2	1 093
3	62,0	746
4	70,4	1 110
5	69,1	1 011
Total -5	Promedio total -67,7	Promedio total -97,14

Este resultado es congruente con la microestructura alcanzada en las muestras, la cual resulta ser de martensita sobre una matriz de carburos+austenita.

Después de cinco mediciones, entre las diferentes dimensiones de la probeta, se obtuvo que la dureza promedio (HRC) es de 67,7.

Conclusiones

Luego de cinco mediciones de dureza, como característica mecánica de la aleación X28H2, se concluye que esta, en estado bruto de colada, posee una dureza promedio de HRC 67,7.

En la estructura interna del hierro X28H2, en estado bruto de colada, se observa la presencia de carburos de cromo del tipo Cr_7C_3 y $Cr_{23}C_6$ eutécticos y austenita eutéctica en estado de suministro, comportamiento propio de una fundición hipoeutéctica, así como la martensita, siendo menor la fracción volumétrica de austenita retenida.

A través de la determinación del porcentaje de microconstituyentes se establece que, en estado bruto de colada, las tres fases presentes proporcionan dureza a la fundición; siendo los carburos de cromo (24,58 %) y la martensita (13,19 %) las que más aportan esta propiedad mecánica.

Referencias bibliográficas

ASTM E3-95. 2001. Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA.

BELZUNCE, F. 2001. Aceros y fundiciones: estructuras, transformaciones, tratamientos térmicos y aplicaciones. Asturia, Universidad de Oviedo, 208 p.

BOERI, R. E. 1989. *The solidification of ductile cast iron*. Doctoral dissertation. University of British Columbia.

DARDATI, P. D.; CELENTANO, D. J.; GODOY, L. A. & BOERI, R. E. 2002. Simulación numérica del proceso de solidificación de la fundición dúctil. *Mecánica Computacional* 21(4): 2855-2874.

DARDATI, P.; GODOY, L.; CELENTANO, D. & BERTORELLO, H. 2004. Modelo para la simulación numérica de la solidificación de la fundición dúctil. *Mecánica Computacional* 23: 2653-2677.

FERNÁNDEZ, I. & BELZUNCE, 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.

GRESQUESI, E.; RODRÍGUEZ, I. & FERNÁNDEZ, T. 2017. Caracterización del acero 70XL empleado en la fabricación de bolas para la molienda del Clinker. *Minería y Geología* 33(4): 486-497.

LEE, K.; LEE, S. & LEE, M. 2006. Worst case communication delay of real-time industrial switched Ethernet with multiple levels. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 53(21): 1669–1676.

LIU, H. H.; WANG, J.; SHEN, B. L.; YANG, H. S.; GAO, S. J. & HUANG, S. J. 2007. Effects of deep cryogenic treatment on property of 3Cr13Mo1V1. 5 high chromium cast iron. *Materials & design* 28(3): 1059-1064.

RIVERA, G.; BOERI, R. & SIKORA, J. 2000. Influencia de la inoculación sobre el refinamiento de la estructura de solidificación y sobre las propiedades mecánicas Jornadas SAM–IV Coloquio de Fundiciones Esferoidales Eutécticas, Latinoamericano de Fractura y Fatiga, Agosto.

YUANZHONG, L. & MAORANG, L. 1998. CN 118 0 110.