

# Determinación de las propiedades metalúrgicas del acero fundido AISI 1545

**Ariana Rodríguez Suárez**

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

**Tomás Fernández Columbié**

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

**Anabael Ruiz Padilla**

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

**Eider Sánchez Olivero**

Universidad de Moa

**Resumen:** Se determinaron las propiedades metalúrgicas del acero AISI 1545, obtenido por el proceso de fundición para ser empleado en la fabricación de las llantas y los rodillos del transportador rotatorio Jacoby. Se analizaron tres muestras obtenidas en el proceso de fundición. Las microestructuras presentan estructuras perlítica, austenítica, ferrítica y de sulfuro de manganeso, en las cuales la perlita se encuentra entre un 42,6 y un 46,63 % en las muestras 2 y 3, como fase predominante, precedida por la fase ferrita, las cuales están asociadas a los elementos químicos carbono, cromo y molibdeno que son elementos alfégenos; el sulfuro de manganeso (MnS) es el más notorio en la muestra 1, con un valor de 36,77 %. La dureza determinada es de 179,6 HV para la muestra 1, de 286,3 HV en la muestra 2 y de 281,3 HV para la muestra 3.

**Palabras claves:** microestructuras; perlita; ferrita; dureza; proceso de fundición.

## Determination of the metallurgic properties of cast steel AISI 1545

**Abstract:** The metallurgical properties of AISI 1545 steel, obtained by the casting process to be used in the manufacture of the tires and rollers of the Jacoby rotary conveyor, were determined. Three samples obtained in the casting process were analyzed. The microstructures present pearlitic, austenitic, ferritic and manganese sulfide structures, in which pearlite is between 42.6 and 46.63% in samples 2 and 3, as the predominant phase, preceded by the ferrite phase, which are associated with the chemical elements carbon, chromium and molybdenum that are alloying elements; manganese sulfide (MnS) is the most noticeable in sample 1, with a value of 36.77%. The determined hardness is 179.6 HV for sample 1, 286.3 HV for sample 2 and 281.3 HV for sample 3.

**Keywords:** microstructure; pearlit; ferrite; hardness; casting process.

## Introducción

La ciencia e ingeniería de los materiales están unidas ya que el conocimiento y procesos de fabricación de los mismos, posibilita la conversión para su uso industrial. El acero es una aleación de hierro carbono que contiene elementos de aleación, los cuales le confieren propiedades mecánicas específicas para su utilización en la industria metalmeccánica. Los microaleados contienen una microestructura ferrita/perlita y una composición parecida a los denominados dulces (Askeland y Wright, 2016).

El acero según refieren Badeshia y Honeycombe (2006); Askeland y Wright (2016), es la aleación estándar con la cual son comparados los nuevos materiales estructurales. Sin embargo, se mantiene en constante cambio debido a los descubrimientos en la metalurgia del hierro y sus aleaciones. Por lo tanto, el acero permanece como la aleación más exitosa, ya que mantiene una relación de costo/eficiencia sobre los demás materiales, lo cual ocasiona que sea consumido en billones de toneladas anualmente.

El manganeso está incluido en los aceros, debido, principalmente, a que se añade como elemento de adición para neutralizar la perniciosa influencia del azufre y del oxígeno, que siempre suelen contener los mismos al encontrarse en estado líquido en los hornos durante los procesos de fabricación. Actúa también como desoxidante y evita, que en la solidificación se desprendan gases, que dan lugar a porosidades en el material. Al no encontrarse aleado, sería dificultoso el laminado y forjado, debido a que el azufre, presente en mayor o menor cantidad, formarían sulfuros de hierro, cuerpos de bajo punto de fusión (981 °C aproximadamente) y para estas operaciones es necesario alcanzar temperaturas por encima de los 1 000 °C (Rodríguez, Fernández & Rodríguez, 2018).

Los aceros ordinarios y los aleados en los que el manganeso no es elemento fundamental, suelen contener generalmente porcentajes variables de 0,30 a 0,80 %. Entre los aleados al manganeso de uso más frecuente son:

- Aceros al manganeso de gran resistencia, generalmente pertenecen al grupo de media aleación, en los que al emplearse en cantidades variables de 0,80 a 1,60 %, con contenidos en carbono de 0,30 a 0,050 %, se consigue mejorar la templeabilidad y obtener combinaciones de características mecánicas aún en piezas de cierto espesor.
- Aceros indeformables con 1 a 3 % de Mn y 1 % de C, aproximadamente, en los que la presencia de un alto porcentaje, hace posible el temple con simple enfriamiento en aceite, o el aire, las deformaciones de las herramientas son muy pequeñas.

- Aceros austeníticos al manganeso con 12 % de Mn y 1 % de C, a la temperatura ambiente son austeníticos y tienen resistencia al desgaste, empleándose principalmente, para cruzamientos de vías, mordazas de máquinas trituradoras, excavadoras.

### Proceso de fundición

Ingle y Narkhede (2018) plantean que, es frecuente considerar los procesos de fundición como un barómetro para medir el estado económico de una sociedad, basándose en que los metales son la clave del desarrollo de la industria; y que este, es la etapa inicial y básica para producir los bienes materiales a ser usados en las demás industrias, es decir, es un bien de capital. Para realizarlo, se requiere del metal líquido y el molde o matriz en que se depositará. Es por consecuencia que, al analizarlo, es necesario referirse al molde o matriz, sus materiales, duración y su producción; al metal líquido y a las técnicas de fusión utilizadas, tipo de hornos y mecanismos de preparación y desgasificación.

En el proceso, el metal fundido fluye por gravedad u otra fuerza dentro de un molde donde se solidifica y toma la forma de la cavidad (Figura 1). El término fundición se aplica también a la parte resultante de este proceso. Es uno de los más antiguos de formado y el principio consiste en: fundir el metal, vaciarlo y dejarlo enfriar.

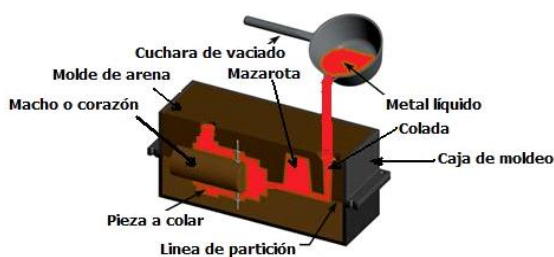


Figura 1. Descripción del proceso de colada. Kalpakjian y Schmid (2008).

El enfriamiento y la solidificación del metal comienzan desde que este entra en contacto con las paredes del molde por ser los puntos de menor temperatura dentro de la masa líquida, pero se procura que la entrada se realice lo más rápidamente posible, con la mayor parte del proceso de solidificación se realiza con el metal inmóvil dentro del molde. El proceso en esencia se reduce a que el calor contenido en la masa de metal se transfiere al molde a través de la superficie de contacto entre ambos (Liu y Kou, 2015).

## Microestructura en la solidificación

La solidificación de un líquido origina tres zonas características, la de granos finos (zona fría) es una banda estrecha de granos orientados aleatoriamente en la superficie del molde. El metal que está en la pared es el primero en enfriarse a una temperatura igual o menor que la de solidificación. Esta zona de granos finos puede explicarse por la velocidad de nucleación y baja velocidad de crecimiento dado el alto grado de subenfriamiento que hay en la zona adyacente a las paredes frías. En ella es muy probable una nucleación heterogénea.

La solidificación comienza de las paredes del molde hacia el interior del mismo, lo que hace que exista un frente de solidificación que avanza hacia el interior en función de la disminución de la temperatura con el tiempo. Lekakh (2015) asegura además que, la forma del frente tiene importancia práctica, pues la característica del rechupe depende del tipo de frente, donde se presentan cuatro formas principales: plano, columnar, dendrítico, con nucleación independiente.

La zona columnar contiene granos alargados orientados en una dirección cristalográfica particular. Conforme el molde del material libera calor de la fundición, los granos en la zona fría empiezan a crecer en la dirección opuesta al flujo de calor, o de las áreas más frías a las más calientes de la fundición. Los granos crecen más rápidamente en ciertas direcciones cristalográficas (Borsato *et al.*, 2016).

En los metales con una estructura cristalina cúbica, los granos en la zona fría que tienen una dirección perpendicular a la pared del molde, crecen más rápidamente que otros orientados menos favorables. Al final en la zona columnar tienen direcciones paralelas entre sí, proporcionando a la columnar propiedad anisotrópicas. Estos pueden estar compuestos de dendritas si el líquido está subenfriado, o puede proceder la solidificación por crecimiento planar de los columnares si no ha ocurrido subenfriamiento.

La zona equiaxial está ubicada en el centro, contiene granos nuevos orientados aleatoriamente, originados a menudo por una baja temperatura de vaciado, elementos de aleación, o agentes inoculantes o refinadores de grano. Dyja, Gawronska & Sczygiol (2015) plantean que, tales granos son relativamente redondos o equiaxiales, con una orientación aleatoria e impiden el crecimiento de los columnares. La formación de esta zona ocasiona que tal porción de la fundición presente un comportamiento isotrópico.

El objetivo del trabajo es la determinación de las propiedades metalúrgicas del acero fundido AISI 1545, para establecer su comportamiento microestructural y establecer si es posible ser empleado en la fabricación de las llantas y los rodillos del transportador rotatorio Jacoby.

## **Desarrollo experimental**

### **Selección del material**

Las propiedades mecánicas del acero AISI 1545 permiten su obtención por el proceso de fundición de las llantas y los rodillos del transportador rotatorio Jacoby. Sin embargo, la fundición de este tipo de material genera dificultades; primero, el punto de fusión es más elevado que las aleaciones comunes de fundición; el intervalo de solidificación queda por debajo de 1 450 °C. Esto significa que la temperatura de vaciado requerida está aproximadamente en los 1 600 °C (Rodríguez, Fernández & Rodríguez, 2018).

A elevadas temperaturas, la reactividad química es alta. Se oxida fácilmente y disuelve gases, así que deben usarse procedimientos especiales durante la fusión y el vertido para aislar al metal fundido del aire. Por otra parte, el acero fundido tiene una fluidez relativamente baja, y esto limita el diseño de componentes con secciones delgadas.

Para la selección del material se tuvo en cuenta las condiciones de trabajo a que están expuestas las piezas seleccionadas como la fricción por rodadura; altas temperaturas; vibraciones. Por tanto, los criterios para la selección del material son: resistencia mecánica; al desgaste; a elevadas temperaturas y a las vibraciones.

### **Proceso de fundición de la aleación**

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 a estudiar es de 1 450 °C y la temperatura de vertido de 1 600 °C. La selección de los materiales de carga se realizó de acuerdo a la composición química de la aleación objeto de estudio. Se comprobó que los mismos estuviesen limpios de grasa, suciedad y de tamaño tal que no dañasen el revestimiento del horno, por lo que se hizo necesario pesarlos, lo cual se realizó en una balanza digital de pesaje industrial.

### Obtención de las probetas metálicas

Las probetas metálicas se obtuvieron mediante el vertido del metal líquido en el molde previamente confeccionado a partir de una plantilla, dando lugar a la solidificación de las mismas, se utilizaron plantillas sueltas sin sistema de alimentación, recomendadas para la fabricación de una sola pieza o una serie de pequeñas cantidades; se obtuvieron las probetas y a partir de ellas se elaboran las muestras para realizar los análisis propuestos. En la figura 2 se muestra las probetas obtenidas.



Figura 2. Muestras obtenidas producto del moldeo.

### Análisis de la composición química de la aleación

En la tabla 1 se muestra la composición química estándar del acero aleado AISI 1545, según *Alloy Casting Institute* (ACI), muestra la designación adoptada por la AISI y SAE, de la *American Society for testing Materials* – ASTM y la SAE.

Tabla 1. Composición química estándar de la aleación, % en masa

Aleación	C	Mn	Si	P	S
1545	0,5 – 0,60	0,8 – 1,2	0,2 – 0,42	0,05	0,05

Según la composición química, la aleación se caracteriza por ser un acero de medio contenido de carbono que presenta una microestructura ferrita/perlita, este acero al manganeso posee gran resistencia, posee buena templabilidad y excelentes características mecánicas.

### Comportamiento microestructural de las probetas obtenidas

El análisis microestructural consistió en la observación de una muestra patrón del acero aleado fundido como se muestra en la figura 3. Se empleará para establecer el comportamiento del material de las muestras después de obtenerlo por el proceso de fundición y para determinar el los microconstituyentes presentes.

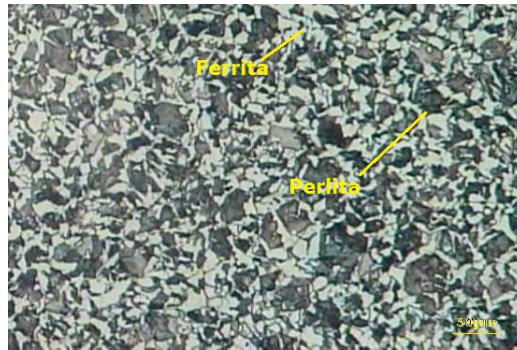


Figura 3. Muestra patrón del acero aleado fundido AISI 1545.

En la microestructura se observa homogeneidad, la misma está compuesta por una matriz de ferrita con presencia de la perlita. La ferrita es del tipo alotriomórfico.

Para la medición de la microdureza en las muestras fundidas se realizaron un total de tres mediciones con una separación entre lectura y lectura de tres milímetros, además se promediaron dichos valores, se les cálculo la desviación estándar. 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
1	HV1 <sub>B</sub>	HV1 <sub>C</sub>	HV1 <sub>CB</sub>
2	HV2 <sub>B</sub>	HV2 <sub>C</sub>	HV2 <sub>CB</sub>
3	HV3 <sub>B</sub>	HV3 <sub>C</sub>	HV3 <sub>CB</sub>

En la figura 4 se muestra el procedimiento descrito en la tabla 4 para la obtención de la microdureza Vickers.



Figura 4. Zonas de medición de dureza.

Según se observa en la figura 4, se realizó un barrido en toda la superficie con el objetivo de analizar la dureza y las microestructuras presentes.



## Resultados y discusión

### Análisis de la composición química de la aleación fundida

El análisis químico del acero aleado AISI 1545, como se muestra en la tabla 3, se realizó en un espectrómetro de masa cuántico, ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón.

Tabla 3. Composición química del acero aleado AISI 1545, en %

C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr	Ni	Cu
0,58	0,31	1,29	0,02	0,04	0,001	0,25	0,15	0,34

En correspondencia con la composición química obtenida, se observa que la misma se encuentra entre los parámetros que se establecen para los elementos químicos, por lo que se puede plantear que, luego del proceso de fundición el acero obtenido se corresponde con el planteado por las normas. Por lo tanto, estos elementos garantizarán la dureza, la resistencia al desgaste corrosivo, erosivo y abrasivo en las condiciones más cercanas a las de explotación en las llantas y los rodillos del transportador rotatorio.

### Análisis del comportamiento microestructural de las muestras

Se realizó el comportamiento microestructural de la muestra 1 de acero aleado AISI 1545, en la que se consideraron tres probetas. En la figura 5 se observan los resultados.

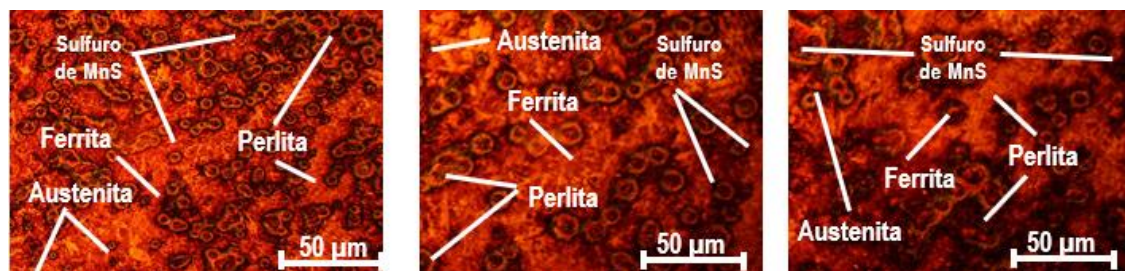


Figura 5 a) Muestra 1 b). Muestra 2 c). Muestra 3.

En las tres muestras analizadas se observa que, luego del proceso de colada, el acero, está compuesto por fases como ferrita, perlita y austenita dispersa en la matriz, también hay presencia de sulfuro de manganeso (MnS) distribuido en la matriz. Este comportamiento está asociado, en primer lugar, a la concentración de las deformaciones en la capa de ferrita que no comienza su formación hasta los 650 °C, temperatura a la

que presumiblemente el espesor de esta haya crecido y su efecto concentrador de tensiones impida que el mecanismo observado a mayores temperaturas se origine.

En segundo lugar, puede estar asociado a que la temperatura de enfriamiento haya sido lenta, con lo cual, mayor cantidad de Mn tendría tiempo de difundir a los límites de grano y los precipitados se enriquecerán en Mn, con el aumento de su punto de fusión. Si la velocidad de enfriamiento es suficientemente lenta dominará la precipitación de MnS que es una fase estable y con alto punto de fusión, con lo que se evitará la fragilización por *hot shortness*, según lo refieren Gawronska, Sczygiol & Dubow (2016).

Para la muestra 2 se siguió el mismo procedimiento, mostrado en la figura 6, donde se observa una mayor homogeneidad en la estructura, el acero fundido mantiene los mismos microconstituyentes, pero aquí, la perlita ocupa un área mayor sobre la matriz, así como una presencia limitada del sulfuro de manganeso (MnS)

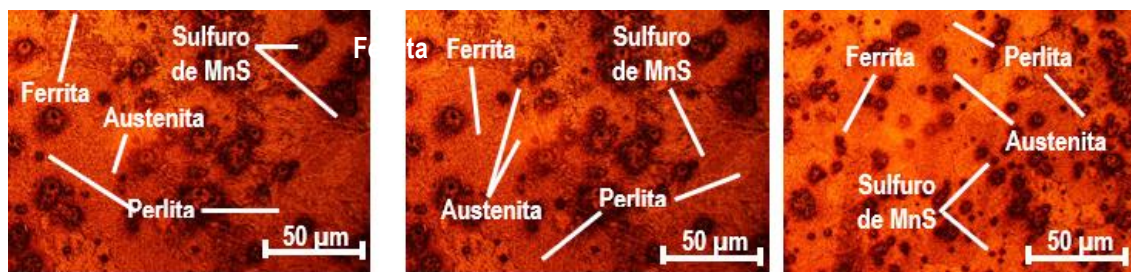


Figura 6 a) Muestra 1 b). Muestra 2 c). Muestra 3.

La recuperación de la ductilidad a bajas temperaturas se consigue al aumentar la fracción en volumen de ferrita. En ese caso, ya no se encuentra en forma de una fina capa donde rodea los límites de grano austeníticos y por lo tanto no concentra las deformaciones en dichas regiones. Además, la diferencia de resistencia entre la ferrita y la austenita disminuye al bajar la temperatura, aumenta la deformación plástica en la austenita y disminuye la deformación en la ferrita, de forma que ya no se localiza en lugares preferentes.

La figura 7 muestra el comportamiento obtenido en las tres muestras analizadas de las probetas número tres, puede observarse el sulfuro de manganeso (MnS) que ocupan un área dentro de la austenita, lo que presumiblemente esté asociado al proceso de solidificación, los precipitados al enriquecerse de Mn quedan atrapados en la austenita que no tuvo tiempo de transformarse.



Figura 7 a). Muestra 1. b) Muestra 2 c) Muestra 3.

Los sulfuros que se han formado en las muestras analizadas han sido en los límites de grano y en las zonas inter dendríticas, lo que demuestra que las probetas fundidas del acero AISI 1545 se solidificaron in-situ, pero debido a que la temperatura de enfriamiento fue lenta, los mismos no tuvieron un carácter acicular, estos son más finos cuanto más rápida es la velocidad de enfriamiento. Estos sulfuros actuarán como otros precipitados finos, inmovilizando los límites de grano, para favorecer el crecimiento de las grietas formadas por deslizamiento en los límites de grano y retardar la aparición de la recristalización dinámica. Cuando la presencia de los sulfuros afecte a la ductilidad por los mecanismos citados, estos afectarán a la ductilidad en la zona austenítica.

### Análisis de la microdureza

En la determinación de la microdureza la utilización de técnicas de indentación convencional e instrumentadas. Existen modelos propuestos en la literatura para la determinación del módulo de elasticidad y entre los más utilizados, se pueden citar el de Marshall, Noma & Evans (1982) y Oliver y Pharr (2004). La tabla 4 muestra los resultados.

Tabla 4. Resultados de las durezas realizadas, en HV

Zona/muestra	1	2	3
Borde	190	295	290
÷ centro y borde	179	287	280
Centro	170	277	274
Promedio	179,6	286,3	281,3

Luego de realizado el barrido de dureza en las diferentes zonas de las tres muestras fundidas, se observa que la menor la presenta la muestra 1, desde 170 hasta 190 HV y la mayor es en la muestra 2, en la cual esta propiedad en las zonas medidas es desde 277 hasta 295 HV. La variación es parte del proceso de solidificación, el borde al estar en contacto con las paredes del molde solidifica más rápido, luego este se hace más lento en la medida que se dirige al centro de la pieza.

Otro aspecto asociado a las variaciones de la dureza es por la presencia del sulfuro de manganeso (MnS) ya que estos que se han formado en los límites de grano de zonas interdendríticas debido al modo de solidificación (*in-situ*) y son más finos en la muestra 3 porque la velocidad de enfriamiento fue más rápida. Estos actuarán como otros precipitados finos, inmovilizando los límites de grano, lo que favorecería el crecimiento de las grietas formadas por deslizamiento en los límites de grano y retardaría la aparición de la recristalización dinámica.

## Conclusiones

Al caracterizar la microestructura del acero aleado fundido AISI 1545 por la presencia de la perlita, y de ferrita, se puede plantear que el mismo reúne los requisitos para la fabricación las llantas y los rodillos del transportador rotatorio Jacoby.

En las microestructuras resultantes de las zonas analizadas se determinó que la fase que predomina es la perlita entre un 42,6 y un 46,63 % en las muestras 2 y 3, precedida por la fase ferrítica, las cuales están asociadas a los elementos químicos carbono, cromo y molibdeno que son elementos alfégenos y en la muestra 1 el más notorio es el sulfuro de manganeso, (formador de carburos) en la fundición.

Los perfiles de dureza establecidos están en correspondencia con el porcentaje de microconstituyentes presentes en las microestructuras, para una dureza de 179,6 HV para la muestra 1, se incrementa hasta 286,3 HV en la muestra 2 y de 281,3 para la muestra 3, caracterizado por la presencia de perlita.

## Referencias bibliográficas

ASKELAND, D. & WRIGHT, W. 2016. *Ciencia e Ingeniería de Materiales*. Cengage Learning Editores, Ciudad de México.

BADESHIA, H. & HONEYCOMBE, R. 2006. *Steels*. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.

BORSATO, T.; BERTO, F.; FERRO, P. & CAROLLO, C. 2016. Effect of in-mould inoculant composition on microstructure and fatigue behaviour of heavy section ductile iron castings. *Procedia Structural Integrity* 2(1): 3150-3157.

DYJA, R.; GAWRONSKA, E. & SCZYGIOL, N. 2015. The effect of mechanical interactions between the casting and the mold on the conditions of heat dissipation: a numerical model. *Archives of Metallurgy and Materials* 60(3): 1901-1910.

GAWRONSKA, E. SCZYGIOL, N. & DUBOW, E. 2016. Numerical modeling of equiaxed structure forming in the cast during alloy solidification. *Procedia Engineering* 136(13): 101-107.

INGLE, P. & NARKHEDE, B. 2018. A literature survey of methods to study and analyze the gating system design for its effect on casting quality. *Materials Today: Proceedings* 5(2): 5421-5429.

KALPAKJIAN, S. & SCHMID, S. 2008. *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. Pearson Educación, Londres.

LEKAKH, S. 2015. High strength ductile iron produced by the engineered cooling: process concept. *International Journal of Metal casting* 9(2): 21-30.

LIU, J. & KOU, S. 2015. Effect of diffusion on susceptibility to cracking during solidification. *Acta Materialia* 100 (10): 359-368.

MARSHALL, D.; NOMA, T. & EVANS, A. 1982. A Simple Method for Determining Elastic Modulus to Hardness Communications of the American Ceramic Ratios using Knoop Indentation Measurements. *Society* 65(10): 175-176.

OLIVER, W. & PHARR, G. 2004. Review: Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. *Journal of Materials Research* 19(1): 3-20.

RODRÍGUEZ, A.; FERNÁNDEZ, T.; RODRÍGUEZ, I. 2018. Solidificación y microestructura de un acero al manganeso obtenido por fundición. *Minería y Geología* 34(1): 494-503.