



Análisis microestructural y determinación del proceso de manufactura del material utilizado en la elaboración de chumaceras

Microstructural analysis and determination of the manufacturing process of the material used in the production of journal bearings

Análise microestrutural e determinação do processo de fabricação do material utilizado na produção de mancais de m ancal

Carlos Oswaldo Serrano-Aguilar ^I
carlos.serrano@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-0653-1115>

Miguel Ángel Escobar-Guachambala ^{II}
maescobar@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-9683-1479>

Evelyn Paola Villarroel-Pérez ^{III}
evelyn.villarroel@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-4907-2673>

Wladimir Alejandro Silva-Castelo ^{IV}
wladimir.silva@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-1920-6239>

Correspondencia: carlos.serrano@epoch.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

***Recibido:** 02 de enero de 2022 ***Aceptado:** 22 de enero de 2022 * **Publicado:** 16 de febrero de 2022

- I. Universidad Ingeniero Mecánico, Magíster en Ingeniería Mecánica con Mención en Materiales y Procesos de Manufactura, Master Universitario en Ingeniería Matemática y Computación, Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Grupo de Investigación & Vinculación AUTOPRO, Riobamba, Ecuador.
- II. Ingeniero Mecánico, Magíster en Diseño, Producción y Automatización Industrial, Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Grupo de Investigación y Estudios en Bioingeniería GIEBI.
- III. Estudiante de la Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- IV. Estudiante de la Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

Resumen

En el presente trabajo de investigación se realiza el análisis micrográfico y de dureza de una chumacera de hierro fundido tras haber sufrido una fractura. Se inicia localizando el lugar más crítico donde se presenta la fractura. De aquí se extraen probetas y de acuerdo con la Norma ASTM E3, se prepara metalográficamente, con el objeto de evaluar la microestructura y determinando que el Hierro Fundido Gris es el material con el que fue fabricada la chumacera. Una vez conocido el material, se determina los métodos y materiales necesarios para la caracterización de las probetas de acuerdo con la Norma ASTM E407. Los resultados obtenidos, se compararon con la bibliografía del Metals HandBook, sección Iron Cast, donde se encuentran fotomicrografías de este tipo de material tomadas a diferentes escalas, y se confirma que los resultados obtenidos en el Laboratorio de Materiales de la ESPOCH son los correctos. Para finalizar se utilizó el programa ImageJ, el mismo que permite realizar un análisis de las fotomicrografías, midiendo hojuelas de grafito, y determinando el tipo y tamaño de las mismas, esto permite conocer el comportamiento del elemento para así poder determinar una posible causa de su ruptura, cabe recalcar que este tipo de chumaceras tienen grafito como antifriccionante, y su dureza debe ser menor de 350 HB, esto se debe a que la dureza debe ser menor a la del eje, una vez determinados estos valores, se propondrá una solución a este problema, y así evitar la fractura prematura de la pieza.

Palabras Claves: análisis metalográfico; hierro fundido gris; chumacera; dureza; hojuelas de grafito.

Abstract

In the present research work, the micrographic and hardness analysis of a cast iron pillow block after having suffered a fracture is carried out. It begins by locating the most critical place where the fracture occurs. Specimens are extracted from here and, in accordance with the ASTM E3 Standard, it is prepared metallographically, in order to evaluate the microstructure and determine that Gray Cast Iron is the material with which the bearing was manufactured. Once the material is known, the methods and materials necessary for the characterization of the specimens are determined in accordance with the ASTM E407 Standard. The results obtained are compared with the Metals HandBook bibliography, Iron Cast section, where photomicrographs of this type of material taken at different scales are found, and it is confirmed that the results obtained in the ESPOCH Materials Laboratory are correct. Finally, the ImageJ program was obtained, the same

one that allows an analysis of the photomicrographs, measuring graphite flakes, and determining their type and size, this allows knowing the behavior of the element in order to determine a possible cause of its rupture, it should be emphasized that this type of bearings have graphite as an antifriction agent, and their hardness must be less than 350 HB, this is because the hardness must be less than that of the shaft, once these values have been determined, a solution will be proposed to this problem, and thus avoid premature fracture of the piece.

Keywords: metallographic analysis; gray cast iron; rowlock; hardness; graphite flakes.

Resumo

No presente trabalho de pesquisa é realizada a análise micrográfica e de dureza de um pillow block de ferro fundido após ter sofrido uma fratura. Começa localizando o local mais crítico onde ocorre a fratura. Daqui são extraídas amostras e, de acordo com a norma ASTM E3, é preparada metalograficamente, a fim de avaliar a microestrutura e determinar que o Ferro Fundido Cinzento é o material com o qual o rolamento foi fabricado. Uma vez conhecido o material, os métodos e materiais necessários para a caracterização dos corpos de prova são determinados de acordo com a Norma ASTM E407. Os resultados obtidos foram comparados com a bibliografia do Metals HandBook, seção Iron Cast, onde podem ser encontradas fotomicrografias deste tipo de material tiradas em diferentes escalas, e confirma-se que os resultados obtidos no Laboratório de Materiais ESPOCH estão corretos. Para finalizar, foi utilizado o programa ImageJ, o mesmo que permite uma análise das fotomicrografias, medindo os flocos de grafite, e determinando seu tipo e tamanho, isso permite conhecer o comportamento do elemento para determinar uma possível causa de sua ruptura, deve-se ressaltar que este tipo de rolamentos tem grafite como agente antifricção, e sua dureza deve ser inferior a 350 HB, isso porque a dureza deve ser menor que a do eixo, uma vez determinados esses valores, um será proposta uma solução para este problema, e assim evitar a fratura prematura da peça.

Palavras-chave: análise metalográfica; ferro fundido cinzento; cadeado; dureza; flocos de grafite.

Introducción

La siguiente investigación se efectuó con el fin de analizar la causa de la fractura en la chumacera (P208), y así proponer posibles soluciones para evitar la misma.

La producción del hierro fundido es una de las más importantes a nivel internacional, a comparación del resto de producciones ferrosas y no ferrosas juntas, superado solo por el acero laminado, esto se debe a sus ventajas entre las que tenemos, su fácil maquinabilidad, su dureza, su resistencia a la corrosión, al desgaste, y al choque térmico y por ser auto lubricantes, sin embargo, se tiene la desventaja de que son poco soldables. (Del Castillo, 2007)

La chumacera es una combinación de un rodamiento radial de bolas, sello, y un alojamiento de hierro fundido de alto grado o de acero prensado, suministrado de varias formas. La superficie exterior del rodamiento de bola y la superficie interior del alojamiento son esféricas, provocando de esta manera el alineamiento automático (NTN Corporation, 2009)

Como se mencionó en el párrafo anterior la chumacera necesita hierro fundido, que por lo general es gris, éste se caracteriza por sus hojuelas de grafito el cual mejora sus propiedades tribológicas, además dichas hojuelas dan el típico color gris a la superficie, cuando existe alguna fractura. (Groover, 1999)

Una chumacera puede ser fabricada, de bronce, o de hierro fundido siendo la segunda opción la más económica, sin embargo, al tomar esta opción, se debe tener en cuenta que esta chumacera resistirá bajas cargas, así como bajas velocidades, sin embargo, existe la ventaja de que el grafito ayuda como anti-friccionante. (Garcia, Martin, Pino, & De la Rosa, 2010)

En cuanto a la dureza, esta debe ser menor a los 350 HB, debido a que no puede superar la dureza del eje, puesto que esto ocasionaría que el eje se desgastara, provocando una falla en el sistema. Para lograr esta dureza se hacen aleaciones con el hierro fundido siendo el Aluminio, el Silicio y el Manganeso, los elementos más utilizados, para otorgar al hierro fundido estas propiedades. (Garcia, Martin, Pino, & De la Rosa, 2010)

Además, se puede disminuir su dureza mediante tratamiento térmico, ya sea por recocido o normalizado, esto variará la distribución del grafito de forma heterogénea, otorgándole menor dureza. (Del Castillo, 2007)

En el análisis se tiene una chumacera P 208 fabricada de hierro fundido gris, es auto lubricante, esto se dedujo por su orificio en la parte superior, cabe recalcar que, al desprenderse el grafito, el aceite tiende a ubicarse en estos alojamientos, logrando así una mayor vida útil y lubricación de este, dicha chumacera se la utiliza en un rango de temperatura de 100 a 200 °C y con una carga máxima de 1590 N y una velocidad inferior a 10 rpm. Debe ser instalada en una superficie rígida

y plana, además se debe tomar en cuenta el apriete de los pernos, en este caso se utiliza un perno M14 con un par de apriete de 76 Nm o 677 lbf plg. (NTN Corporation, 2009)

En conclusión, el trabajo de investigación busca identificar la distribución del grafito, sus fases, y su dureza, para comprobar que cumplan los requerimientos antes descritos (dureza menor a 350 HB, matriz ferrítica, grafito con distribución heterogenea), además se debe de cumplir a cabalidad las recomendaciones dadas por el fabricante (carga máxima, velocidad, superficie, apriete, instalación, lubricación, ...).

Metodología experimental

Materiales y Equipos

Materiales y equipos empleados:

- Lijas 200, 320, 400, 600, 1000 y 1200 *granos/in²*.
- Pulidora.

Características:

- ✓ Marca Huaying.
- ✓ Para muestra metalográfica plana.
- ✓ Plato simple.
- ✓ Alimentación de 360V.
- Microscopio óptico.
 - ✓ Marca Buehler
 - ✓ Microscopio invertido y compacto
 - ✓ Iluminación disponible.
 - ✓ El cuerpo trinocular permite el acceso integrado para el adaptador de la cámara.
 - ✓ Lente objetivo 5X, 10X, 20X, 50X
- Durómetro.
 - ✓ Marca Huaying
 - ✓ Para muestra metalográfica plana
 - ✓ Dureza Rockwell, Brinell, Vickers con indentadores
 - ✓ Carga máxima 1839 N
- Microscopio con micrómetro.

- ✓ Marca Mitutoyo
- ✓ Iluminación incandescente
- ✓ 2 Ejes de medición

Análisis de la Microestructura

Para analizar la microestructura se desbasta la probeta, hasta obtener una superficie tipo espejo (ASTM E3)

Luego se realiza el análisis del grafito en la probeta y se determina el tipo, así como el tamaño de las hojuelas. (ASTM A247)

Finalmente se debe realizar la comparación con el libro Metal Handbook, (Capítulo Cast Irons) en donde se compara el tipo de hojuela y las fases presentes en la probeta.

Para realizar el análisis del tipo de hojuela, se recurre a la Tabla 1.

Tabla 1 Tamaño de hojuela.

Size Class	Actual Dimension (μm) ^A
1	≥ 1280
2	640 to < 1280
3	320 to < 640
4	160 to < 320
5	80 to < 160
6	40 to < 80
7	20 to < 40
8	< 20

Fuente: NORMA ASTM A 247-17

Análisis de Dureza

Para este análisis la probeta debe tener dos superficies planas, para poder aplicar la carga.

Dureza Rockwell

La dureza Rockwell o ensayo de dureza Rockwell es un método para determinar la resistencia de un material a ser penetrado. El ensayo de dureza Rockwell constituye el método más usado para

medir la dureza debido a que es muy simple de llevar a cabo y no requiere conocimientos especiales.

Antes de iniciar con el ensayo se debe escoger la escala a utilizar dependiendo del material de la probeta. Si no se sabe qué material es o que indentador utilizar, se empieza usando el indentador más duro, al menos duro. (ASTM E18)

Para realizar este ensayo se debe seguir los siguientes pasos:

- Se presiona contra la probeta el indentador.
- Se encera el equipo aplicando la precarga.
- Se aplica la carga según la escala utilizada.
- Se retira la carga y se toma el valor medido.
- Repetir en las mismas condiciones 2 huellas adicionales, a fin de obtener un promedio.

Dureza Brinell

Se denomina dureza Brinell a una escala de medición de la dureza de un material mediante el método de indentación, midiendo la superficie dejada por el indentador en el material a estudiar.

Para realizar este ensayo se siguió los siguientes pasos:

- La superficie (plana y lisa) del material se presionó contra una bola de acero con determinado diámetro D.
- Se mantuvo el indentador 15 segundos bajo la carga P.
(Para obtener la carga se analiza la siguiente Tabla 2).

Tabla 2 Valores de la carga

Carga en función del Ø penetrador y la naturaleza del material a ensayar				
Diámetro de la bolilla [mm]	Materiales, Constantes de Ensayo y Cargas [Kg]			
	Aceros y fundición C=30	Aleaciones de Cu y Al C=10	Cobre y aluminio C=5	Plomo, estaño y aleaciones C=2,5
10	3000	1000	500	250
5	750	250	125	62,5
2,5	187,5	62,5	31,2	15,6
1,25	46,9	15,6	7,81	3,91
0,625	11,7	3,91	1,977	0,977

Notar que cada una de las combinaciones posibles se cumple $C=P/D^2$

Fuente:
Norma
Astm E10

- Se retiró la carga y se midió los dos diámetros, en direcciones mutuamente perpendiculares, con ayuda de un microscopio.

- Se sustituyeron los valores en la fórmula para obtener el valor de la dureza Brinell.

$$HB = \frac{P}{\frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{Ec. 1})$$

Dónde:

$HB = \text{dureza Brinell (Kg /mm}^2\text{)}$

$P = \text{carga utilizada (kg)}$.

$D = \text{diámetro de la bola (mm)}$.

$d = \text{diámetro de la huella en la superficie (mm)}$.

$$\pi = 3,1416$$

- Repetir en las mismas condiciones 2 indentaciones más, para poder tener un promedio.

Análisis y discusión de resultados

Se comparó las microestructuras obtenidas con las del metal Handbook (Cast Irons).

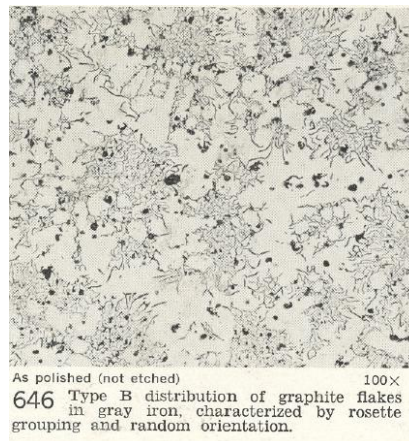


Ilustración 1 Distribución de grafito tipo B de escamas de grafito en hierro gris, caracterizada “por agrupación en roseta (no grabada) y orientación aleatoria (100X) sin ataque (Metal Handbook Cast Irons).



Ilustración 2 Microestructura hierro fundido tomada en el laboratorio lo negro grafito sin ataque (111X).

Al comparar la ilustración 1 y 2 se puede observar que varias hojuelas de grafito coinciden tanto en la distribución como en la separación, con la micrografía del Metal Handbook Cast Iron 646. Cabe recalcar que existe una mínima diferencia de tamaño debido al aumento, la ilustración 1 tiene un aumento de 100X y la ilustración 2 tiene un aumento de 111X.

ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS CON ATAQUE QUÍMICO.

Para este análisis se utilizaron dos métodos, en el primero solo se visualizó los diferentes componentes, y en el segundo se comparó con el libro Metal Handbook.

Análisis visual de la probeta

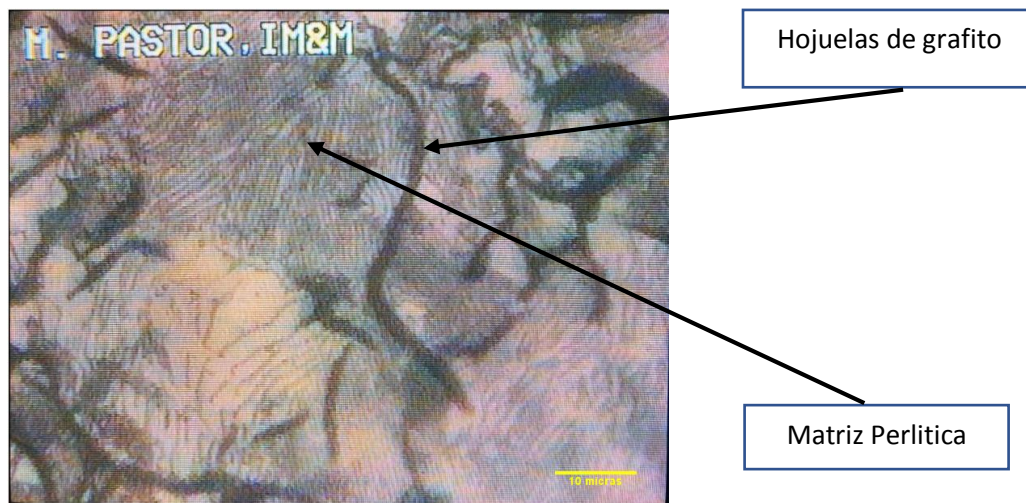


Ilustración 3. Micrografía de hierro fundido atacado con nital al 2%, matriz Perlítica (cardenillo), y hojuelas de Grafito (negro) (444x).

En la Ilustración 3 se puede observar las distintas fases presentes en el hierro fundido, las cuales se detallan; sin embargo, este análisis no es suficiente, por lo que se realizó un análisis comparativo.

Análisis comparativo de la probeta



Ilustración 4. Hierro fundido con presencia de grafito en escamas en una matriz perlítica fina (gris abigarrado) con menos del 10% de ferrita libre y menos 5% de cementita libre nital 5% (100X) (Metal Handbook Cast Irons).



Ilustración 5. Micrografía de hierro fundido con matriz perlítica y hojuelas de grafito (lo negro) nital 2% (111X).

En las ilustraciones 4 y 5, existen similitudes en el tamaño de hojuela de grafito, así como en la distribución de la matriz perlítica, cabe recalcar que el aumento del lente difiere un poco, así como

el porcentaje de nital, sin embargo, no es una diferencia considerable, y se puede deducir que las micrografías son similares.

Análisis del Tipo y Tamaño de Hojuela de Grafito.

Para el análisis del tipo de Hojuela se recurrió a la norma ASTM A247, en donde se detalla cada tipo de hojuela de grafito, además se debe tomar en consideración que la norma indica que esta comparación debe hacerse a 100X. (ASTM A247)

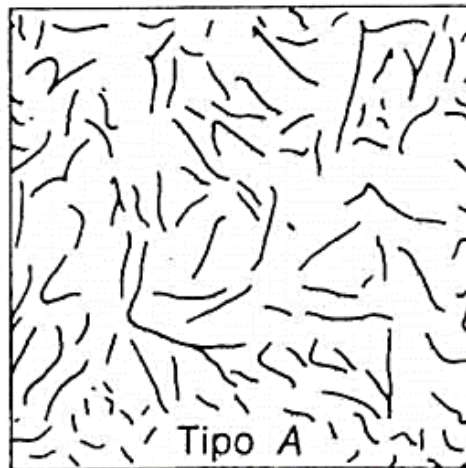


Ilustración 6. Micrografía de la norma ASTM para determinar el tipo (Tipo A) (100X).



Ilustración 7. Micrografía de hierro fundido sin ataque (111X)

En la ilustración 6 y 7 se realizó la comparación de la micrografía con la Norma ASTM A247-17, obteniendo que el tipo de Hojuela de grafito corresponde al Tipo A.

Tamaño y Distribución de las Hojuelas de Grafito.

Para medir el tamaño de hojuelas de grafito, se utiliza Software Image J, el cual determina el tamaño de las hojuelas (promedio, máximo) en base a estas medidas se compara con la norma.



Ilustración 8. Micrografía hierro fundido, lo negro hojuelas de grafito sin ataque (111X)

Tabla 3. Medidas de hojuelas de grafito, mediante Image J

Results							
File	Edit	Font	Results				
Label	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length	
52	57.932	112.603	62.667	179.007	-28.393	48.819	
53	53.890	144.693	73.159	201.095	-36.573	44.804	
54	88.919	149.867	91.253	193.345	-129.352	75.053	
55	70.057	145.671	92.245	182.393	-123.071	59.559	
56	87.572	117.266	69.036	163.130	-96.242	74.729	
57	Mean	58.972	131.851	56.006	190.567	-50.492	60.672
58	SD	28.736	20.908	29.061	28.692	53.158	12.909
59	Min	6.465	83.272	0.000	118.333	-147.265	26.797
60	Max	109.128	169.088	103.511	248.444	51.340	93.378

En la Tabla 3 se obtiene un valor promedio de 60,67 y un valor máximo de 93,38, con estos datos se examina los valores en la Tabla1. Obteniendo que es un tamaño de hojuela tipo 5.



Ilustración 9. Microestructura de hierro fundido Tamaño 5 (hojuelas de grafito lo negro) (Introducción a la Metalurgia Física AVNER)



Ilustración 10 Microestructura de hierro fundido, lo negro hojuelas de grafito sin ataque (111X)

Finalmente se realiza un análisis visual del tipo de Hojuela en las Ilustraciones 9 y 10, en donde se puede observar que existen similitudes en las micrografías.

Luego de realizar el análisis micrográfico con y sin ataque químico, se obtiene que el hierro fundido cumple con las especificaciones en cuanto a la distribución de grafito, así como de fases presentes en el material.

Análisis de la Dureza Brinell

Se midió el diámetro de la huella dejada por la bola en la superficie del material y se aplicó la Ec.

1. Se analiza la Tabla 2 de la dureza Brinell, obteniendo:

El diámetro del indentador es 255 mm, la precarga es 100 N, y la carga es 1839 N o 187,5 Kgf, esto se lo realizó en un tiempo de 15 segundos.

Probeta de hierro fundido



Ilustración 11 Muestra de Chumacera de hierro fundido

Huella 1:

Diámetro horizontal=1,05 mm

Diámetro vertical=1,09 mm

Obteniéndose un promedio igual a 1,07 mm

$$HB = 198,48_{2,5/187,5/15} [Kg/mm^2]$$

Huella 2:

Diámetro horizontal=0,965 mm

Diámetro vertical=1,025 mm

Obteniéndose un promedio igual a 0,995 mm

$$HB = 231,177_{2,5/187,5/15} [Kg/mm^2]$$

Huella 3:

Diámetro horizontal=1 mm

Diámetro vertical=1,01 mm

Obteniéndose un promedio igual a 1,005 mm

$$HB = 226,393_{2,5/187,5/15} [Kg/mm^2]$$

Con un promedio se tiene:

$$HB = 218,683_{2,5/187,5/15} [Kg/mm^2]$$

Dureza Rockwell

En este se utilizó el durómetro, para obtener el valor de la dureza Rockwell. La dureza Rockwell fue igual a 11 lo cual no es válido, puesto que si es menor a 20 no es un resultado confiable (ASTM E18).

Conclusiones

- Al realizar un análisis metalográfico y con observación de la microestructura se concluye que es un hierro fundido gris, caracterizado por las hojuelas de grafito en orientación aleatoria.
- Se logró determinar las diferentes fases presentes como es la matriz perlítica y hojuelas de grafito.
- Con la ayuda del programa imageJ se logró determinar, el tamaño de las hojuelas, siendo la Tipo 5 en base a la norma ASTM A247.
- En dureza Brinell se logró obtener un valor máximo de 231,177, aplicando los parámetros de la norma como es el tiempo de aplicación y diámetro de indentador, dicha dureza está dentro del rango de 140 a 250 Brinell típico del hierro fundido gris
- La chumacera (P208) cumplió con los parámetros establecidos en cuanto a distribución de grafito, tamaño de hojuelas y de dureza, por lo tanto, se concluye que la falla se produjo por un exceso de carga (1590N) o de velocidad (10 rpm).

Recomendaciones

- Se recomienda el correcto manejo de los equipos puesto que su mal uso, puede nos datos erróneos, en especial en los ensayos de dureza.
- En la dureza Rockwell no se logró ningún resultado, por lo que se recomienda la realización de otro método.
- Se recomienda cambiar el tipo de chumacera a una de mayor carga, además en el momento de su montaje es de suma importancia que se instale en una superficie rígida y plana como recomienda el fabricante.

Referencias

1. ASTM A247. (s.f.). *Standard test evaluating the microstructure of graphite in iron castings*. Pensilvania.
2. ASTM COMMITTEE. (s.f.). *METAL HANDBOOK MICROSTRUCTURE OF GRAPHITE IN IRON CASTINGS*. Pensilvania.
3. ASTM E18 . (s.f.). *Standard test methods for Rockwell hardness of metallic materials*. Pensilvania.
4. ASTM E18. (s.f.). *Standard test methods for Rockwell hardness of metallic materials*. Pensilvania.
5. ASTM E3. (s.f.). *Standard guide for preparation of metallographic specimens*. Pensilvania.
6. Del Castillo, F. (2007). *Lecturas de Ingeniería Hierros Fundidos*. Cautitlan Izcalli.
7. Garcia, A., Martin, L., Pino, L., & De la Rosa, A. (2010). Fundición gris aleada con Al, Si y Mn para la fabricación de la chumacera de los carros ferroviarios para el transporte de la caña. *Centro azucar*, 43-50.
8. Groover. (1999). *Fundamentos de Manufactura Moderna*. Mexico: Prentice May.
9. NTN Corporation. (2009). Chumacera. *Chumacera*, 513.
10. Sydney, A. (1985). *Introducción a la Metalografía Física*. Mexico: Mc Graw Hill.
11. Ayala Ochoa, D. A., & Mosquera Recalde, G. E. (2011). *Análisis de la zona afectada por el calor en aceros hipoeutectoides* (Bachelor's thesis, QUITO/EPN/2011).
12. Correa Macías, F. J. (2018). Análisis Micrográfico de una Unión Soldada con Postcalentamiento en un Acero AISI/SAE 1045 en Doble Fase.
13. Aguirre-Breffé, Y., Fernández-Columbié, T., Rodríguez-González, I., Castillo-Matos, R., & Izaguirre-Bonilla, C. (2019). Microestructura del hierro fundido gris FG 24 sometido a tratamiento térmico. *Minería y Geología*, 35(1), 140-159.
14. López-Nadal, R., Carvajal-Fals, H. D., Sánchez-Roca, A., & Zoqui, E. J. (2015). Características de la microestructura del hierro fundido gris tixotomado. *Minería y Geología*, 31(4), 51-69.
15. Paredes Robalino, M. B. (2011). *Estudio del recocido en el hierro fundido gris y su incidencia en la dureza* (Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Carrera de Ingeniería Mecánica).

16. Ramírez Cardona, M. O. (2017). *Tratamientos térmicos y análisis de ensayos de tensión, compresión y dureza según Norma ASTM aplicados al hierro fundido* (Doctoral dissertation, Universidad de San Carlos de Guatemala).
17. Celentano, D., Schulz, B., & Cruchaga, M. (2004). Análisis termofluidodinámico-microestructural de proceso de solidificación de fundiciones grises. *Revista Matéria*, 9(2), 73-79.
18. Canzio Ildelfonso, C. A. (2011). Análisis de microestructura en hierro fundido nodular y evaluación de superficie de fractura en probetas de impacto Charpy mediante el uso del software Image-Pro Plus.