 Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña - Colombia Vicerrectoría de Investigación	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	Código F-AC-DBL-007	Fecha 10-04-2012	Revisión A
Dependencia DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	Aprobado SUBDIRECTOR ACADEMICO		Pág. i(116)	

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	Jhon Brayner Herrera Perea		
FACULTAD	Ingenierías		
PLAN DE ESTUDIOS	Ingeniería Mecánica		
DIRECTOR	MSc. Ricardo Andrés García León		
TÍTULO DE LA TESIS	EVALUACIÓN DE LA FUNDICIÓN GRIS NODULAR CON LA APLICACIÓN DE TÉCNICAS TÉRMICAS PARA EL MEJORAMIENTO DE SUS PROPIEDADES MECÁNICAS		
RESUMEN (70 palabras aproximadamente)			
<p>EN ESTE ESTUDIO EXPERIMENTAL SE UTILIZARON MUESTRAS FABRICADAS A PARTIR DE FUNDICION NODULAR, LAS CUALES FUERON SOMETIDAS A DIVERSOS TRATAMIENTOS TERMICOS PARA OBSERVAR EL CAMBIO EN LA DUREZA Y LA MICROESTRUCTURA, DONDE LOS NUEVOS VALORES DE ESTAS PROPIEDADES SE OBTUVIERON POR MEDIO DE DIVERSAS PRUEBAS DE LABORATORIO COMO: CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA, CARACTERIZACIÓN MECÁNICA POR DUREZA BRINELL, CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM), ESPECTROMETRÍA DE DISPERSIÓN DE ENERGÍA DE RAYOS X (EDS) Y DIFRACCIÓN DE RAYOS X (XRD).</p>			
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 104	PLANOS: 0	ILUSTRACIONES: 48	CD-ROM: 1



Vía Acolsure, Sede el Algodonal, Ocaña, Colombia - Código postal: 546552
 Línea gratuita nacional: 01 8000 121 022 - PBX: (+57) (7) 569 00 88 - Fax: Ext. 104
 info@ufpso.edu.co - www.ufpso.edu.co

**EVALUACIÓN DE LA FUNDICIÓN NODULAR CON LA APLICACIÓN
DE TÉCNICAS TÉRMICAS PARA EL MEJORAMIENTO DE SUS
PROPIEDADES MECÁNICAS**

AUTOR:

JHON BRAYNER HERRERA PEREA

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar por el título de
Ingeniero Mecánico**

Director:

MSc. RICARDO ANDRES GARCIA LEÓN

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA MECÁNICA

Ocaña, Colombia

Agosto 2019

Índice

Capítulo 1. Evaluación de la fundición gris nodular con la aplicación de técnicas térmicas para el mejoramiento de sus propiedades mecánicas.	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Formulación del problema	1
1.3 Descripción del problema	1
1.4 Objetivos	2
1.4.1 General	2
1.4.2 Específicos.....	2
1.5 Justificación.....	2
1.6 Delimitaciones.....	3
1.6.1 Geográfica.	3
1.6.2 Conceptual.....	4
1.6.3 Operativa	4
1.6.4 Temporal.....	4
Capítulo 2. Marco referencial	5
2.1 Marco Histórico	5
2.1.1 Revisión del estado del arte.....	5
2.2 Marco Conceptual	13
2.2.1 Fundición.....	13
2.2.2 Microconstituyentes de las fundiciones.....	15
2.2.3 Clasificación de las fundiciones por su microestructura	15
2.2.4 Clasificación de las fundiciones por su fractura.....	16
2.2.5 Diagrama hierro-carbono.....	19
2.2.6 Tratamientos térmicos	25
2.2.7 Problemas de los tratamientos térmicos	45
2.3 Marco Teórico.....	45
2.3.1 Hierro dúctil o nodular.	45
2.3.2 Composición y tipos de matrices de la fundición nodular	49
2.3.3 Propiedades de la fundición nodular o dúctil	50
2.3.4 Clasificación de las fundiciones nodulares.....	51
2.3.5 Aplicaciones de la fundición nodular o fundición dúctil.....	51
2.4 Marco Legal	53
Capítulo 3. Diseño metodológico.....	56
3.1 Tipo de Investigación.....	56
3.1.1. Etapas del proyecto.....	56
3.2 Presupuesto	58
Capítulo 4. Resultados	59
4.1 Estudiar las propiedades mecánicas y físicas de la fundición nodular por medio de las diferentes bases de datos, con la finalidad de establecer sus características más importantes.	
59	
4.1.1 Buscar en las bases de datos como ScienceDirect y Scopus información relacionada con la fundición nodular y tratamientos térmicos.....	59
4.1.2 Seleccionar la información más pertinente y necesaria para conocer las propiedades mecánicas de la fundición nodular y sus características	60

4.1.3 Analizar los distintos tipos de tratamientos térmicos aplicados a las fundiciones nodulares.	60
4.2 Realizar el tratamiento térmico de templado, revenido y recocido mediante pruebas de laboratorio para optimizar las propiedades mecánicas de la fundición nodular	61
4.2.1 Buscar los materiales y equipos necesarios para la realización de los tratamientos térmicos.	61
4.2.2 Preparar las probetas de la fundición nodular para las respectivas pruebas.	64
4.2.3 Planificar los ensayos para obtener los resultados de las pruebas de laboratorio.	66
4.3 Realizar el tratamiento térmico de templado, revenido y recocido mediante pruebas de laboratorio para optimizar las propiedades mecánicas de la fundición nodular.	69
4.3.1 Tabular los resultados obtenidos mediante ensayos de laboratorio.	69
4.3.2 Comparar los resultados bibliográficos y los obtenidos en los ensayos de laboratorio	74
4.3.3 Realizar análisis de la metalografía por medio de análisis SEM y EDS.	80
Conclusiones	84
Referencias	85
Apéndices	90
Apéndice A. Muestras metalográficas modificadas en el software ImageJ.	90
Apéndice B. Análisis de estudios EDS (Microestructura y grafica de cantidad de elementos químicos).	95
Apéndice C. Resultados de los análisis por medio Microscopio electrónico de barrido (SEM).	102

Lista de tablas

Tabla 1. Composición química de las 4 muestras de fundición nodular.	9
Tabla 2. Fundiciones y su superficie de fractura	16
Tabla 3. Clasificación de la perlita	22
Tabla 4. Características de las fases	25
Tabla 5. Temperatura en grados centígrados para temple de los aceros según % C	29
Tabla 6. Severidad de temple	33
Tabla 7. Rango de temperatura del revenido.....	34
Tabla 8. Influencia del recocido de ferritización a 760°C, en tanto a dureza y resistencia a la tracción.	41
Tabla 9. Practicas recomendadas para recocidos de fundiciones nodulares	44
Tabla 10. Diferentes tipos de matrices nodulares.....	49
Tabla 11. Propiedades de la fundición nodular	50
Tabla 12. Clasificación fundición nodular según la norma ASTM A-536.....	51
Tabla 13. Presupuesto.....	58
Tabla 14. Marco de referencia de algunas fuentes consultadas.....	60
Tabla 15. Tratamientos térmicos aplicados a las muestras.....	61
Tabla 16. Ensayos tratamientos térmicos.	68
Tabla 17. Tratamientos térmicos aplicados	68
Tabla 18. Durezas obtenidas en los ensayos de laboratorio	74
Tabla 19. Cantidad de nódulos de grafitos en las diversas microestructuras.	78
Tabla 20. Fases cristalinas de la muestra 3A.....	83

Lista de figuras

Figura 1. Falla por sobrecalentamiento el disco de freno. Fuente. (Kashima University, 2013).	5
Figura 2. Estructura micrográfica típica de un hierro nodular ferrítico. Fuente (Rizzo, 2014)	7
Figura 3. Influencia de la geometría del disco en el aumento de temperatura. Fuente. (Karan Dhir, 2016).	11
Figura 4. Clasificación de las fundiciones. Fuente. Modificado de (Castro, 2009).	14
Figura 5. Microestructuras de las fundiciones de acuerdo a la distribución del carbono. Fuente. (Universidad Politecnica de Valencia, 2017)	16
Figura 6. Microestructura de hierro gris (ferrita perlita). Fuente. (Aguirre & Fernandez, 2018)	17
Figura 7. Microestructura de fundición blanca. Fuente. (Castro, 2009, p.58).	18
Figura 8. Fundición atruchada. Fuente. (Garzon, 2017).	18
Figura 9. Diagrama Fe-C. Fuente. (Sanchez, 2013)	20
Figura 10. Cristales blancos de perlita y retícula negra de cementita en un acero de 1,10% de carbono recocido. Fuente. (Apraiz, 1949).	23
Figura 11. Piezas sometidas a calentamiento en algún tratamiento térmico. Fuente. (Insertec, 2016).	26
Figura 12. Tratamiento térmico de recocido. Fuente: (Censa Industrial, 2017)	27
Figura 13. Grafica T v t de temple y revenido. Fuente. Modificado de (Apraiz Barreiro, 1949)	34
Figura 14. Acero para herramientas AISI H13 (0,9 % C, 1 %, 1 % Mn, 0,50 % Cr, 0,50 % W austenizado a 980° C, templado en aceite y revenido a 218° C). Fuente. (Va Larre, 2000).	36
Figura 15. Efecto de la temperatura de revenido sobre las propiedades de un acero SAE 1050. Fuente: (Escuela de Ingenieria Julio Garavito, 2008).	37
Figura 16. Efecto del revenido en la dureza de un acero de 0,62% C templado, realizado durante 1 hora a varias temperaturas. Fuente. (Yu Lajtin, 1973)	38
Figura 17. Representación esquemática de los cambios en microestructura durante el recocido de un acero al 0.20% de carbono, (a) Estructura original, ferrita y perlita de grano grueso, (b) justo por encima de la línea A1, la perlita se ha transformado en pequeños granos de austenita y la ferrita no ha cambiado. (c) Por encima de la línea A3; solo austenita de grano fino y pequeñas áreas perlíticas. Fuente. (Pérez, 1996).	43
Figura 18. Estructura micrográfica típica de un hierro nodular ferrítico-perlítico. Fuente. (Rizzo, 2014).	46
Figura 19. Vaciado de metal fundido. Fuente. (Acosta & Martinez, 2000)	48
Figura 20. Valvula de mariposa fabricada con Hierro Nodular. Fuente. (Simak Ltda, 2019)	52
Figura 21. Engranaje de fundición nodular. Fuente. (Luoyang Evon Engineering, 2016).	53
Figura 22. Disco de freno (material base). Fuente. Autor 2019.	62

Figura 23. Horno Terrigeno utilizado para realizar los tratamientos térmicos. Fuente. Autor 2019.....	62
Figura 24. Durómetro. Fuente. Autor 2019.	63
Figura 25. Bruker D8 Advance. Fuente. (Bruker, 2018)	64
Figura 26. COXEM INTEK. Fuente. (Bruker, 2018).....	64
Figura 27. Geometría del corte de las probetas en SolidWorks. Fuente. Elaboración propia.....	65
Figura 28. Disco de corte. Fuente. Autor 2019.....	65
Figura 29. Probetas obtenidas del disco de freno. Fuente. Autor 2019.	66
Figura 30. Piezas en el horno a 900 °C. Fuente. Autor 2019.....	67
Figura 31. Capa de vapor producida en la etapa de enfriamiento. Fuente. Autor 2019.	67
Figura 32. Muestras de fundición nodular templada. Fuente. Autor 2019.	70
Figura 33. Pico 155 Precision Cutter. Fuente. Autor 2019.	70
Figura 34. Maquina para encapsular muestras TP-7001. Fuente. Autor 2019.	71
Figura 35. Probeta introducida en resina fenólica. Fuente. Autor 2019.	71
Figura 36. Maquina para pulir probetas Nano 2000T. Fuente. Autor 2019.....	72
Figura 37. Pulido final con alúmina. Fuente. Autor 2019.....	72
Figura 38. Metalografía de las diversas muestras de fundición nodular. Fuente. Autor 2019.....	73
Figura 39. Muestras metalográficas con mayor presencia de nódulos de grafito. Fuente. Autor 2019.....	75
Figura 40. Microestructura ferrítica, luego de aplicado el recocido. Fuente. (Restrepo Velez, 2001).....	75
Figura 41. Metalografía del material base (100X). Fuente. Autor 2019.....	76
Figura 42. Microestructura de fundición nodular (SEM). Fuente. (García, 2013).	76
Figura 43. Muestra sometida a recocido con gran presencia de nódulos de grafito. Fuente. Autor 2019.....	77
Figura 44. Microestructura de la fundición nodular modificada en ImageJ. Fuente. Autor 2019.....	77
Figura 45. Representación gráfica de los valores de dureza. Fuente. Autor 2019.	79
Figura 46. a) Micrografía de la muestra 3A con 200x, b) Micrografía de la muestra 3A con 1000X. Fuente. Autor 2019.....	81
Figura 47. EDS de la muestra 3A. Fuente. Autor 2019.	81
Figura 48. RXD de la muestra 3A. Fuente. Autor 2019.	82

Agradecimientos

A mis padres y hermano que me brindan su apoyo incondicional en todas las etapas de formación de mi vida.

A mi director de Tesis el Magister Ricardo Andrés García León por sus consejos, apoyo y respaldo durante la realización de este proyecto.

A todos mis compañeros de estudio que me acompañaron en esta importante etapa de formación.

A los docentes Jaider Vergel, Jhon Arévalo, Juan Fernando Pérez y Pedro Julián García por compartir sus conocimientos y complementar mi formación como profesional.

Introducción

Los frenos de disco tienen una amplia acogida en la industria automotriz, debido a que en comparación con los frenos de tambor absorben más energía cinética al accionar el mecanismo de frenado, lo cual se convierte en una reducción en el tiempo que le tomara al vehículo para detener su marcha. Este fenómeno ocurre porque los dispositivos o elementos que constituyen el mecanismo de freno, en este caso frenos de disco se encuentran al aire libre, es decir, el aire circulante pasa directamente por el disco permitiendo así una mayor disipación de calor. Dicho calor o energía térmica, es ocasionado cuando los elementos del freno de disco (pastillas y disco) entran en contacto para transformar la energía mecánica producida por el motor y transferida mediante los diversos mecanismos que componen el automóvil como son: la caja de cambio, cardan, diferencial y por último transmitido a las ruedas, en energía térmica sobre los componentes de freno el cual gira en conjunto con las llantas.

Para este estudio experimental se emplearon muestras comerciales de fundición nodular, obtenidas desde el material base y adquiridas de un freno de disco vehicular. Muestras que posteriormente serian sometidas a diversos tratamientos térmicos como lo son: templado, revenido y recocido. Estos tratamientos fueron realizados con la finalidad de obtener un aumento en ciertas propiedades mecánicas como: la dureza, la resistencia al desgaste, la corrosión entre otras, donde los nuevos valores de estas propiedades se obtuvieron por medio de diversas pruebas de laboratorio como: caracterización metalográfica, caracterización mecánica por dureza Brinell, caracterización física y química por Microscopia Electrónica de Barrido (SEM, por sus siglas en ingles), Espectrometría de Dispersión de Energía de Rayos X (EDS, por sus siglas en ingles) y Difracción de Rayos X

(XRD, por sus siglas en ingles). Los resultados obtenidos, demuestran que se pueden implementar ciertos tratamientos térmicos en conjunto y a diversas temperaturas logrando un aumento de tres veces el valor de la dureza para la fabricación de frenos de disco, capaces de resistir a las condiciones térmicas que sufren este tipo de componentes.

Capítulo 1. Evaluación de la fundición gris nodular con la aplicación de técnicas térmicas para el mejoramiento de sus propiedades mecánicas.

1.1 Planteamiento del problema

Los frenos de disco utilizados en la industria automotriz se encuentran fabricados a partir de fundición gris nodular, los cuales presentan propiedades mecánicas adecuadas para su funcionamiento. No obstante, estos mecanismos presentan fallas muy comunes, como lo son: agrietamiento influenciado por cambios rápidos de temperatura los cuales debilitan el material del disco, discos doblados, variación de espesor, desgaste excesivo, corrosión, entre otros. Las variaciones de temperatura son presentadas cuando se realiza el uso del freno, en donde interactúan por fricción la pastilla y el disco para generar la detención del vehículo, presentándose de esta manera la acumulación de energía térmica proveniente de la absorción de energía mecánica de la rueda, dicho exceso de energía térmica afecta a las propiedades mecánicas del material. Por lo tanto, se buscan alternativas como tratamientos térmicos para mejorar las propiedades de la fundición gris nodular como es la dureza.

1.2 Formulación del problema

¿Cuál será el mejor tratamiento térmico para mejorar las propiedades mecánicas de la fundición gris nodular para los frenos de discos vehiculares?

1.3 Descripción del problema

En muchas ocasiones en los discos de frenos después de un uso excesivo o repetitivo inicia la aparición de grietas, deformaciones y ranuras, que son presentadas en discos

demasiado blandos o pastillas de freno con un material de baja calidad, que ocasiona pérdida en el proceso de frenado. Por lo tanto, el material apropiado de los discos debe poseer ciertas propiedades que le permitan un óptimo funcionamiento. Es así, que la presencia de alguno o varios modos de falla afectan la seguridad del vehículo como su tiempo de vida útil, de modo que, ponen en riesgo la vida del ocupante.

1.4 Objetivos

1.4.1 General. Evaluar la fundición nodular con la aplicación de técnicas térmicas para el mejoramiento de sus propiedades mecánicas.

1.4.2 Específicos. Estudiar las propiedades mecánicas y físicas de la fundición nodular por medio de las diferentes bases de datos, con la finalidad de establecer sus características más importantes.

Realizar el tratamiento térmico de templado, revenido y recocido mediante pruebas de laboratorio para optimizar las propiedades mecánicas de la fundición nodular.

Analizar los resultados obtenidos mediante comparación bibliográfica y por ensayos de laboratorio para comparar las nuevas propiedades obtenidas por el material

1.5 Justificación

El óptimo funcionamiento de los frenos de disco depende en muchas ocasiones del material seleccionado para la fabricación del disco; por lo tanto, dicho material debe poseer propiedades mecánicas que soporten las etapas de sobrecalentamiento debido a que este será sometido a estas acciones por varios periodos de tiempo. En la mayoría de los casos están

fabricados a partir de fundición nodular el cual posee buenas propiedades mecánicas como lo son su gran dureza y mayor resistencia a la tracción en comparación con la fundición gris, pero que no dejan exento al disco de fallas por sobrecalentamientos que es causada por el repetitivo contacto entre las pastillas y el disco, logrando la aparición de otro fenómeno de daño llamado fading que es presentado cuando el conjunto del sistema de freno supera la temperatura optima de funcionamiento, y ocasionando que parte del líquido de frenos se convierta en burbujas de aire, por lo tanto, dicho aire acumulado disminuye la eficacia de los frenos . Entonces, surge la necesidad de realizar ensayos de laboratorio para mejorar los materiales con la finalidad de aportar a la seguridad de las personas que utilizan los vehículos en su vida diaria para transportarse.

Por otra parte, este trabajo experimental está centrado en mejorar las propiedades del material como son: la dureza, la resistencia al desgaste, la corrosión entre otras, aplicando una serie de tratamientos térmicos a la fundición nodular (material base) como lo son el templado, revenido y recocido. Asimismo, los diversos valores serán obtenidos durante las pruebas sirven para estimar las nuevas propiedades mecánicas las cuales pueden ser adquiridos mediante pruebas de laboratorio, como caracterización metalográfica, caracterización mecánica por dureza Brinell, caracterización física y química por Microscopia Electrónica de Barrido (SEM, por sus siglas en ingles), Espectrometría de Dispersión de Energía de Rayos X (EDS, por sus siglas en ingles) y Difracción de Rayos X (XRD, por sus siglas en ingles) .

1.6 Delimitaciones

1.6.1 Geográfica. El trabajo se realizará en los laboratorios de la UFPSO, UIS y UFPS con la asesoría de director del proyecto.

1.6.2 Conceptual. La temática del proyecto se enmarcará en los siguientes conceptos: Frenos, discos de freno, dureza, tratamiento térmico, templado, tensión, compresión, metalografía.

1.6.3 Operativa. El proyecto se desarrollará con base en los parámetros del presente documento y con la asesoría del director del mismo y las personas que se necesiten como asesores en el transcurso de la investigación para poder realizar los objetivos del proyecto.

1.6.4 Temporal. El presente proyecto tendrá una duración aproximada de 2 a 3 meses a partir de la fecha de aprobación del anteproyecto.

Capítulo 2. Marco referencial

2.1 Marco Histórico

2.1.1 Revisión del estado del arte. En la actualidad existen proyectos en los cuales se han llevado a cabo investigaciones de forma experimental con la implementación de diferentes tratamientos térmicos para el mejoramiento de las propiedades mecánicas de las distintas fundiciones. En lo referente a la fundición gris nodular son muy pocos los tratamientos realizados, en su mayoría son templado y revenido conjuntamente, los cuales aumentan la tenacidad, disminuyendo la dureza y resistencia a la tracción. Sin embargo, la mayoría de los trabajos realizados a los frenos de disco fue a nivel internacional y a nivel nacional no se ha trabajado con este tipo de dispositivos.

2.1.1.1 A nivel internacional. Diferentes autores han realizado investigaciones donde se exponen los efectos de los tratamientos térmicos aplicados a la fundición nodular, además de las distintas fallas y deformaciones ocurridas en los frenos de disco. En la figura 1 se muestra una falla debido al calentamiento presentado en un freno de disco.



Figura 1. Falla por sobrecalentamiento el disco de freno. Fuente. (Kashima University, 2013).

Las aleaciones son obtenidas en la tierra desde la llegada de meteoritos provenientes del espacio, los cuales están conformado de distintos elementos como lo son el hierro, cobalto, níquel, carbono, entre otros. Asimismo, en tanto a las fundiciones fue necesario esperar hasta la invención de algunos hornos improvisados, de tal manera surgieron los altos hornos y hornos cubilotes. Estos son necesarios para la combinación de diversos elementos naturales como hierro o carbono, además de algunos reciclables que dependiendo su proporción en la mezcla proporcionan un diferente material (aleación), es decir, las fundiciones son consideradas aleaciones. Las primeras apariciones de la fundición nodular data desde finales de 1940 en Inglaterra y posteriormente en Estados Unidos, éstas eran obtenidas agregando magnesio a la mezcla presente en el horno y así se lograba la formación de nódulos de grafito en su microestructura, esto ocurre durante el proceso de solidificación. Fue un gran descubrimiento debido a que directamente de la colada se podía obtener un material con alta ductilidad y mayor dureza, de tal manera evitando el uso de algún tratamiento térmico y por ende una minimización en los costos de producción (Rizzo, 2014).

El hierro dúctil, también conocido como hierro nodular, fundición con grafito esferoidal o simplemente fundición nodular, fue desarrollado por primera vez, por H. Morrogh en la British Cast Iron Research Association de Inglaterra, en Julio de 1946, utilizando el elemento cerium como agente nodulizante, para la formación directa de los nódulos de grafito en el líquido. Durante su proceso hubo varios intentos fallidos por su violenta reacción, se probó con magnesio disuelto en níquel como método seguro para la producción directa de nódulos de grafito. Tecnología que acogió el nombre de Ductile Iron e introducida al mercado en marzo de 1947 y atribuyéndole a K. Millies ser el coinventor del hierro dúctil o nodular. Este material pertenece a la familia de las fundiciones gráficas que

poseen mayor ductilidad, propiedad que le confiere excelente resistencia a los golpes, con muy buena aptitud para soportar las deformaciones. Se trata de una aleación con la mayor capacidad de alargamiento obtenida directamente por fusión en su grado o calidad” nodular ferrítica”. Se puede doblar, torcer y deformarse sin fracturarse, lo que la hace ideal para ser utilizada en la elaboración de partes de vehículos expuestas a impactos. En la siguiente figura 2 se muestra la estructura característica de una fundición nodular (Rizzo, 2014).

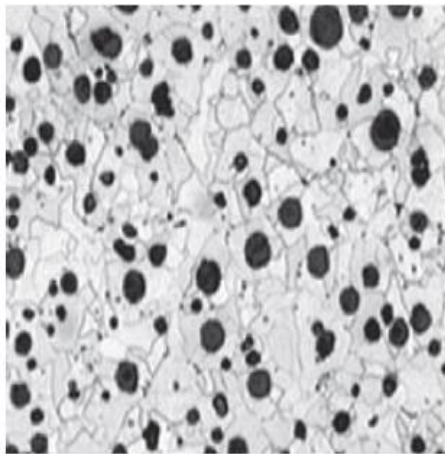


Figura 2. Estructura micrográfica típica de un hierro nodular ferrítico. Fuente (Rizzo, 2014)

El disco de freno generalmente está hecho de hierro fundido, pero algunos casos están hechos de materiales compuestos como carbono reforzado, materiales compuestos de matriz cerámica y compuestos de matriz metálica. El miembro más importante en un sistema de frenado es el disco. El material debe poseer las siguientes propiedades como: Un coeficiente de fricción alto, impermeabilidad a las condiciones ambientales, capacidad para soportar altas temperaturas (estabilidad térmica), alta resistencia al desgaste, flexibilidad y adaptabilidad a cualquier superficie (Shiva, 2017).

El chirrido generado en el freno de disco del automóvil ha sido considerado como uno de los principales problemas en la industria automotriz debido a las quejas persistentes que reduce la satisfacción del cliente. La mayoría de los científicos y los ingenieros han llegado a

la conclusión de que el ruido chirriante en el freno de disco se inicia por la inestabilidad debida a las fuerzas de fricción contribuyendo a vibraciones aleatorias. Las propiedades del material del disco de freno juegan un papel importante en los patrones del modo de vibración. A partir de un análisis de elementos finitos, se muestra que la relación entre el módulo de Young y la densidad aumenta las frecuencias naturales de vibración para el disco con respecto al número de modos y la rigidez del disco. Los resultados de la simulación mostraron que los materiales que tienen menor valor de módulo de elasticidad y mayor valor de densidad tienen valores más bajos de frecuencias naturales de vibración. El modo de vibración y la frecuencia de un rotor de freno de disco son influenciados por frecuencias naturales y modos de rotor estacionario. Por lo tanto, el chirrido de los frenos se produce cerca de las frecuencias naturales del disco (Kharate, 2017).

P. Canzar, Z.Tonkovicn, J.Kodvanj en el año 2012 evaluaron la vida útil basada en la fatiga de la fundición nodular con cuatro microestructuras diferentes, en la cual se pudo observar que los nódulos más grandes de forma irregular reducen tenacidad a la fractura y resistencia a la fatiga. Además, los resultados demostraron que la fase perlítica no afecta fuertemente la vida de fatiga si su proporción no excede de 10%. Para evitar fallas catastróficas en los dispositivos hechos a partir de la fundición, es importante tener en cuenta la influencia de las características geométricas de los nódulos de grafito (tamaño, forma y distribución de nódulos) en la iniciación de grietas por fatiga. Además de la forma de nódulos de grafito, las propiedades mecánicas de hierro fundido se determinan por la matriz de metal. El hierro fundido ferrítico es normalmente blando y dúctil, mientras que la matriz perlítica exhibe alta resistencia y dureza y es propenso a la rotura frágil.

Tabla 1

Composición química de las 4 muestras de fundición nodular.

Tipo de material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mg
100	3.6	2.122	0.204	0.023	0.004	0.978	0.046
200	3.6	2.044	0.112	0.023	0.003	0.619	0.037
300	3.6	1.968	0.114	0.024	0.003	0.572	0.039
400	3.6	1.976	0.102	0.021	0.002	0.674	0.033

Fuente: Modificado de (Canzar, Tonkovic, & Kodvanj, 2012).

Teniendo en cuenta la Tabla 1 las composiciones químicas de los materiales investigados son similares, excepto que el contenido de manganeso, níquel y magnesio son más altos en el tipo de material 100. Por lo tanto, para las pruebas a realizar en este trabajo de investigación se pretende obtener una microestructura con un tamaño de nódulo de grafito grande y de forma irregular para obtener lo mayores valores de resistencia a la fatiga, que otorgara mejores propiedades al material del disco. Luego de las pruebas realizadas se llegó a la conclusión de que el hierro fundido nodular 100 con el mayor contenido de perlita tiene mayor rendimiento y resistencia a la rotura ya que la presencia de esta fase en la microestructura otorga estas excelentes propiedades respecto a los otros tres tipos de materiales y que el material tipo 200 tiene las propiedades mecánicas más débiles (Canzar et al., 2012).

Blaz Samec en conjunto con Iztok Potrc y Matjaz Sraml, documentaron un trabajo relacionado el con hierro fundido nodular EN-GJS500-7, utilizado para discos de freno de ferrocarril, con el cual realizo pruebas de tensión y fatiga cíclica en donde se examinaron la microestructura del material a temperatura ambiente, 300 y 400°C, esta investigación fue realizada en el 2011. Se trabajó con una matriz ferrítico-perlítica, donde se observó que a 400°C se mantiene estable la matriz del material. Además, los ensayos de tracción a

temperatura ambiente arrojaron resultados prácticamente idénticos, mientras que a temperaturas más altas hay una mayor dispersión de resultados. El módulo de Young permaneció bastante estable a los cambios temperatura, mientras que la prueba de esfuerzo y la resistencia a la tracción final disminuyeron al aumentar las temperaturas (Šamec, Potrc, & Sraml, 2011).

El hierro dúctil Austempered (ADI) es una aleación metálica de creciente interés en la industria porque se usa para obtener piezas de alta resistencia a bajo costo de producción. Las piezas ADI, que son utilizadas principalmente por las industrias automotriz y agrícola, se obtienen por medio de procesos de fundición y tratamiento térmico. Este tratamiento termico consiste fundamentalmente en tres pasos. En el primer paso se calienta y se mantiene el material hasta la temperatura de austenizacion que es entre 850°C y 950°C, esto para transformar la matriz inicial que es ferritica-perlitica en una completamente austenitica y con el contenido de carbon apropiado. Luego se enfria la pieza repentinamente hasta la temperatura de austemper hasta 450°C , este proceso tiene que ser lo suficienteme rapido para evitar la formacion de perlita. Y mantenerse a esa temperatura hasta que toda la austenita se halla transformado en bainita. Por ultimo enfriamiento al aire a temperatura ambiente. Permitiendo obtener piezas de mayor dureza, y ademas de reducir tensiones y probabilidad de choque termico (Boccardo & Dardati, 2017).

La forma y geometria del disco estan relacionadas directamente con el fenomeno de disipacion de calor y la probabilidad de recalentamiento. Karan Dhir realizo la simulación en 3 formas diferentes de disco para encontrar la forma más apropiada de un diseño de disco, teniendo como parámetro la variación de temperatura al igual que el prototipo del disco como se muestra en la siguiente figura 3.

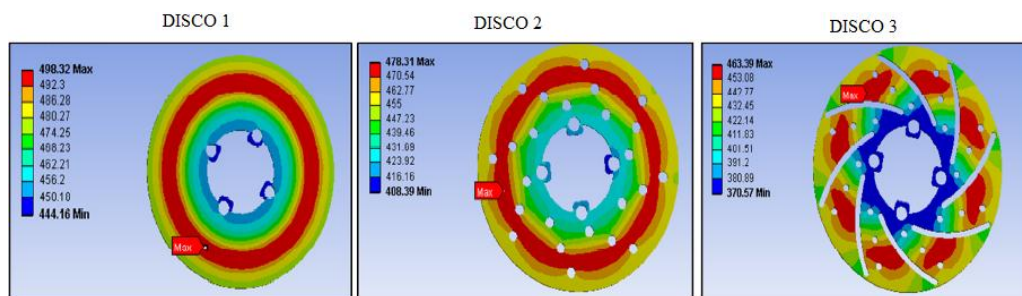


Figura 3. Influencia de la geometría del disco en el aumento de temperatura. Fuente. (Karan Dhir, 2016).

Obteniendo como resultado que el aumento máximo de la temperatura entre los tres discos es en el caso de disco 1 que se eleva de una temperatura ambiente de 21,85 °C hasta un máximo de 225.17 °C en el área de barrido de la almohadilla. La temperatura máxima alcanzada en los otros dos discos es menor que el primer rotor debido a mejores características de enfriamiento y disipación del calor. Las perforaciones realizadas en los discos 2 y 3 aumentan el área de superficie de contacto del disco con el aire, lo que aumenta la tasa de disipación de calor por convección. Además, en lo referente en la vida útil del disco las variaciones geométricas también afectan la duración de la vida total de freno de disco, un simple rotor de disco de tipo de brida (disco 1) tiene una vida máxima y puede sostener bajo mayores valores de cargas cíclicas hasta un 35% más en comparación con el disco 3 con agujeros y orificios de ventilación de perfil aerodinámico en condiciones de carga similares. Estos patrones geométricos representan mayores valores de alternancia de tensión inducida en el rotor, provocando un fallo debido a inicio de agrietamiento y la reducción de la proliferación período grieta (Karan, 2016).

Un estudio realizado sobre el proceso de frenado que consiste en el contacto entre la almohadilla (pastilla de freno) y el disco donde se demostró que debido al calentamiento por fricción intensiva local cerca de una superficie de contacto, se forma el campo de tensiones

de compresión, después del comienzo del frenado en algún momento las tensiones normales de tracción ocurren cerca de la región subsuperficial y cuando estas tensiones exceden la resistencia a la tensión del material, el inicio de las grietas superficiales es posible ocasionando fallas que resultarían imprevistas por parte del conductor del automotor (Aleksander, 2009).

Otra forma de producir fundición nodular es por medio del proceso de forjado de troquel de metal fundido (MMDF). Así como lo experimento LI Nan y XING Shu-ming, en el cual se observó que las esferas de grafito eran finas, redondas y uniformes. El hierro fundido nodular producido por el proceso MMDF tiene alta resistencia y alta plasticidad. El tamaño de la esfera de grafito llegó al grado 7 u 8 y la esferoidización alcanzó al grado 1 o 2. Las esferas de grafito están dispuestas en forma de muchas cadenas cortas, que reciben el nombre de distribución moldeada optimizada. Las muestras se prepararon utilizando una máquina hidráulica especial con la fuerza de prensado máxima de 5000 kN y se obtuvo como resultado que tanto la resistencia como la plasticidad aumentaron con la presión cuando el tiempo de mantenimiento de la presión era mayor que su valor crítico y que el hierro fundido nodular producido por el proceso MMDF se puede mecanizar tan fácil como el tradicional después de mantenerlo a una temperatura estable por más de 4 h obteniendo durezas entre 190 y 185 HB (Li Nan & Shu-ming, 2013, p.28).

Sonia Gordillo mediante pruebas experimentales de aplicación de tratamientos térmicos como revenidos y templados a la fundición de hierro dúctil, comprobó que la aplicación de temple y revenido a 450 °C durante 4h nos arroja una matriz bainítica con un mayor esfuerzo a la tracción que la fundición dúctil tradicional. Además, de que el esfuerzo a la tracción es siempre creciente respecto al tiempo de revenido, pero no es aconsejable a tiempo mayores

de 4h debido a que pierden propiedades de tenacidad y dureza importantes para las aplicaciones como elementos mecánicos automotrices. Se comprobó que, en los tratamientos de revenido, manteniendo constante la temperatura de revenido la resistencia a la tracción aumenta conforme aumenta el tiempo de revenido a su vez la resistencia al impacto y de forma inversa la dureza (Pinto , 2010, p.11).

2.2 Marco Conceptual

2.2.1 Fundición. La fundición es definida como el proceso de fabricación de piezas mediante el colado del material derretido en un molde, en el que luego de transcurrir un tiempo el material adopta la forma de dicho molde (Fundiciones Bou, 2018).

Las fundiciones de hierro son aleaciones de hierro carbono del 2 al 5%, poseen unos porcentajes de silicio del 2 al 4%, del manganeso hasta 1%, bajo azufre y bajo fósforo. Pueden ser vaciadas en los hornos cubilote, y así obtener piezas de distintos tamaños y formas, pero estos no pueden ser sometidos a grandes esfuerzos ni deformaciones plásticas, además de que son dúctiles y poco maleables. Su ventaja es que son duras, resistentes a la corrosión y el desgaste (Castro, 2009, p.15).

Las fundiciones tienen innumerables usos y sus ventajas más importantes son:

- Son más fáciles de maquinar que los aceros.
- Se pueden fabricar piezas de diferente tamaño y complejidad.
- En su fabricación no se necesitan equipos ni hornos muy costosos.
- Absorben las vibraciones mecánicas y actúan como auto lubricantes.
- Son resistentes al choque térmico, a la corrosión y de buena resistencia al desgaste.

De acuerdo con la apariencia de su fractura, las fundiciones pueden ser grises, blancas, atruchadas, aunque también existen las fundiciones maleables, nodulares y especiales o aleadas (Castro, 2009, p.15).

En la siguiente figura 4, se presenta un mapa conceptual donde se observa la clasificación de las fundiciones.

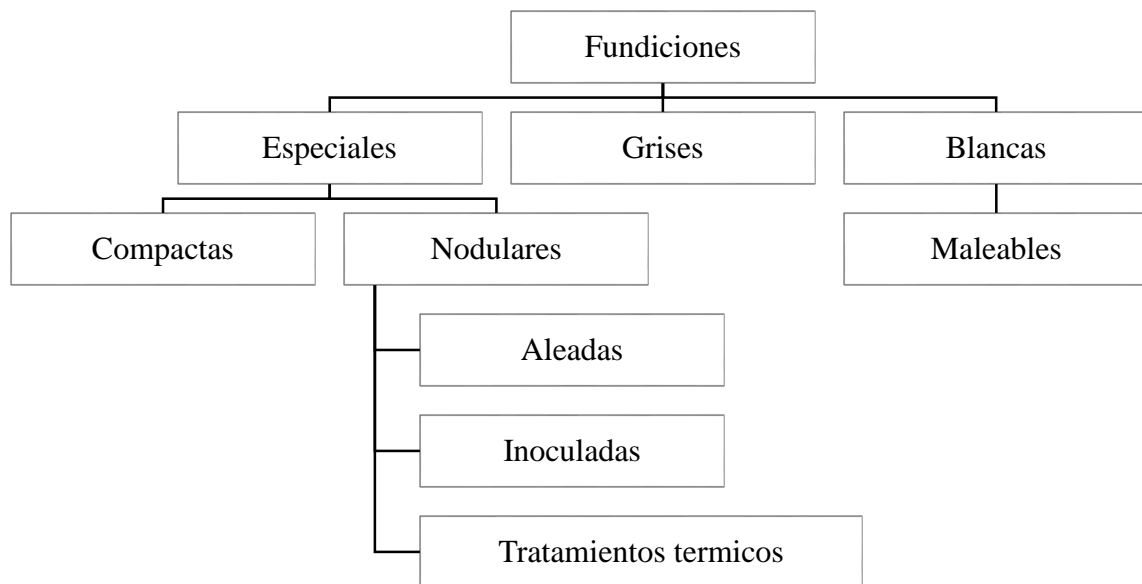


Figura 4. Clasificación de las fundiciones. Fuente. Modificado de (Castro, 2009).

Los aceros y las fundiciones de hierro son los materiales metálicos más utilizados a nivel industrial, debido a que tienen gran ventaja respecto a los demás materiales por su bajo costo y por la posibilidad de fabricar grandes cantidades de productos. Estos materiales son muy solicitados debido a su amplio rango desde resistencias moderadas (200-300 MPa), hasta las alcanzadas por las aleaciones metálicas que alcanzan valores hasta de 2000 MPa. Una forma de endurecer los aceros y las fundiciones de hierro es agregando otros elementos de aleación (Belzunce, 2001).

2.2.2 Microconstituyentes de las fundiciones. En las fundiciones de hierro en algunos casos se presenta que estos tienen los mismos constituyentes de los aceros, más el eutéctico ledeburita compuesto de austenita y cementita, el eutéctico ternario de cementita, ferrita y fósforo de hierro (esteadita) y el carbono en forma de láminas, nódulos o esferitas de grafito, su microestructura se basa en el diagrama hierro carbono estable (Castro, 2009, p.39).

Ledeburita: Esta se puede reconocer debido a que en las zonas se presenta una microestructura conformada por perlita y cementita. Se encuentra constituido de acuerdo a sus porcentajes en 52% de cementita y 48% de austenita con un contenido de carbono del 2%. Este constituyente eutéctico formado a partir del enfriamiento de la fundición líquida con un contenido de 4,3% de carbono a la temperatura de 1145 °C.

Esteadita: Es un constituyente de naturaleza eutéctica duro, frágil (300 a 350 Vickers) y de bajo punto de fusión (960°C), que aparece en las fundiciones de alto contenido en fósforo (más de 0.15 % P) (Castro, 2009, p.41).

2.2.3 Clasificación de las fundiciones por su microestructura. De acuerdo a la microestructura presente en las fundiciones luego de su paso por el horno y/o cubilotes, estas se pueden dividir en 3 grupos que son mencionados a continuación según Pinto (2010).

En la que todo el carbono está compuesto por cementita debido a la combinación del carbono, y que en momento de su fractura presenta un color brillante.

Todo el carbono presente en la fundición está en estado libre, por lo tanto, se obtiene la formación de grafito.

En esta última, en las fundiciones se encuentran presentes de manera combinada la cementita y otra parte libre en forma de grafito.

En la siguiente figura 5 se muestran algunas diferencias que existen en las microestructuras de las fundiciones, de acuerdo a la forma en que el carbono se presenta (combinado o libre).

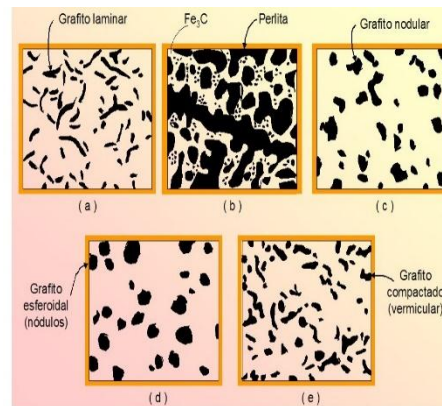


Figura 5. Microestructuras de las fundiciones de acuerdo a la distribución del carbono. Fuente. (Universidad Politecnica de Valencia, 2017)

Las fundiciones de grafito llamadas fundiciones grises ferríticas en las que todo el carbono tiene forma de grafito son muy difíciles de encontrar en la práctica, por lo tanto solo queda en conceptos y bases teóricas para ayudar a diferenciar los otros tipos de microestructuras presentes en las fundiciones (Pinto, 2010).

2.2.4 Clasificación de las fundiciones por su fractura. Según las características morfológicas después de su fractura las piezas fundidas se dividen en tres grupos: blancas, grises y atruchadas como se muestra en la siguiente Tabla 2 (Pinto, 2010).

Tabla 2.

Fundiciones y su superficie de fractura

Fundición	Fractura
Blanca	Presentan superficie de fractura blanca o brillante
Gris y atruchadas	Superficie de fractura de color oscuro
Nodulares	Superficie de fractura de color oscuro debido a la concentración de nódulos de grafito

Fuente: Autor 2019.

Fundición gris: La mayor parte del contenido de carbono en el hierro gris se da en forma de escamas o láminas de grafito (ver figura 6), y son las que otorgan al hierro el color y propiedades deseadas. Debido a sus excelentes propiedades es usado ampliamente en la industria, para la elaboración de bases para maquinas, discos de freno, bloques y cilindros para motores de automóviles, herramientas, etc. Su alto uso es debido a su fácil maquinabilidad, con una alta capacidad de templado, pero en su contra tiene que es muy quebradizo. En la siguiente figura se muestra una microestructura ferrita y perlita de hierro gris (Castro, 2009, p.55).

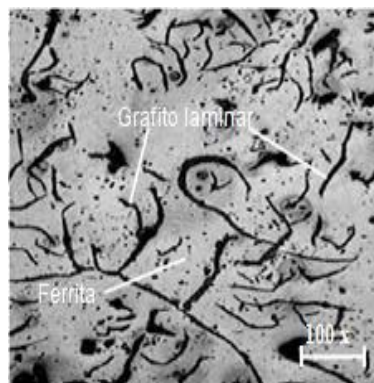


Figura 6. Microestructura de hierro gris (ferrita perlita). Fuente. (Aguirre & Fernandez, 2018)

Fundición blanca: Este tipo de fundición se obtiene cuando se enfría de manera rápida la fundición de hierro (para evitar la grafitización de la cementita) desde el estado líquido. Cuando en estado líquido se llega a los 1130 °C, se obtiene una composición eutéctica (4.3%C) y al momento de enfriarse es solidificado como un eutéctico de austenita y

cementita, el cual tiene el nombre de ledeburita, y se presenta en parte como cementita blanca. Si la pieza de fundición blanca es calentada de nuevo a 870 °C se forma grafito lentamente y se conoce como carbono revenido (ver figura 7), también llamada fundición maleable. Debido a su gran resistencia al desgaste es utilizado para la fabricación de cuerpos molidores (Castro, 2009, p.58).

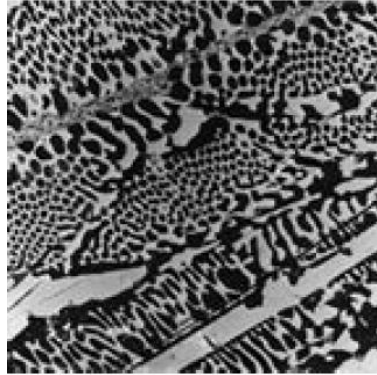


Figura 7. Microestructura de fundición blanca. Fuente. (Castro, 2009, p.58).

Fundición atruchada: En este tipo de fundición el carbono se presenta en estado libre y combinado. Su microestructura está compuesta por una matriz de fundición blanca combinada con fundición gris como se muestra en la siguiente figura 8 (Castro, 2009, p.60).

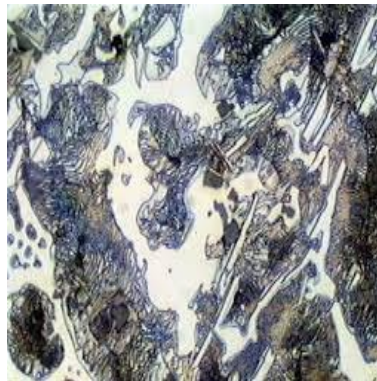


Figura 8. Fundición atruchada. Fuente. (Garzon, 2017).

Fundición nodular: Para la obtención de este tipo de fundición con la microestructura en forma de nódulos o esferoidal es necesario inocular el hierro fundido que sale del horno añadiendo una pequeña cantidad de materiales como magnesio, cerio o ambos. Teniendo esta microestructura se obtienen buenas propiedades como alta ductilidad, resistencia, tenacidad y facilidad de maquinado. Este tipo de fundición es obtenido mediante un horno cubilote, en el cual se mezclan materiales como arrabio, chatarra y piedra caliza. Es conocida también como fundición dúctil o esferoidal, con la particularidad que el contenido de carbono es igual a la de la fundición gris. La presencia de ferrita en la microestructura de la fundición depende de los materiales inoculantes añadidos y de la velocidad de enfriamiento (Castro, 2009, p.55).

2.2.5 Diagrama hierro-carbono. El diagrama de hierro-carbono se hace fundamental para el estudio de los aceros y fundiciones empleados en la industria, además de brindar formación necesaria para saber el tipo de estructura que estas obtendrán luego de aplicado un tratamiento térmico. En este diagrama se pueden observar las distintas fases por la que pasa el material al aumentar su temperatura (en hornos), además de los rangos de temperatura crítica. Según el diagrama los aceros tienen un contenido de carbono menor a 2%, mientras

que las fundiciones de hierro tienen un contenido mayor al 2% llegando aproximadamente hasta un 6% como se muestra en la figura 9 (Belzunce, 2001).

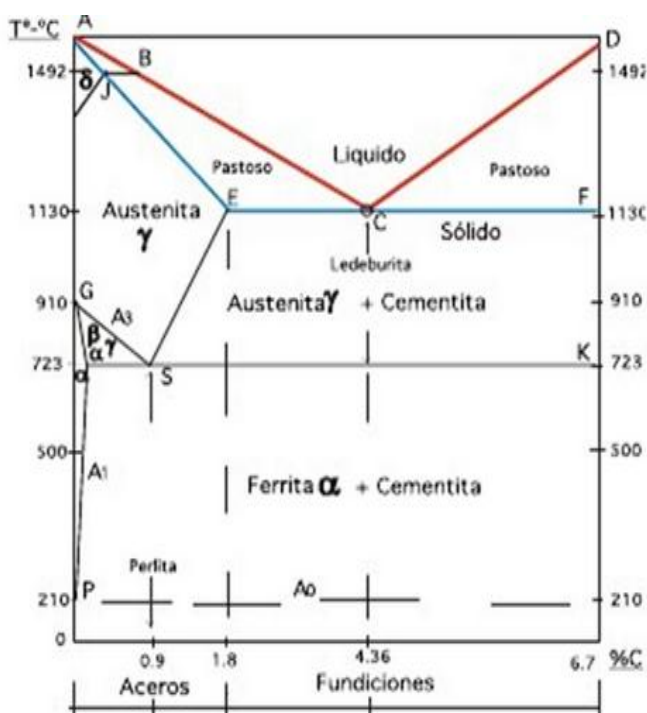


Figura 9. Diagrama Fe-C. Fuente. (Sanchez, 2013) .

Como se mencionó anteriormente, el diagrama Fe-C es fundamental para entender los cambios presentados en los tratamientos térmicos aplicados a los aceros y fundiciones. Donde se puede observar que para porcentajes bajos de carbono encontramos una matriz ferrita ($Fe\alpha$), en la cual es posible disolver hasta 0,025% C a 273 °C. Además de la austenita ($Fe\gamma$) que tiene una solubilidad máxima de 2% C a 1130 °C. Por último se encuentra la ferrita (Fe_3C) (Yu Lajtin, 1973).

En el diagrama Fe-C, se pueden apreciar varias líneas que limitan las distintas regiones presentes donde se generan cambios estructurales. Es ahí donde nos encontramos con las temperaturas de transformación designadas como temperaturas críticas (A1, A3, Acm). En donde A1 y A3 son el intervalo de temperatura donde está el comienzo y final de la

transformación de la austenita, partiendo de la presencia de ferrita y perlita. Y Acme me indica la temperatura donde se separa el dominio de la estabilidad de la austenita de la zona bifásica correspondiente a la austenita más (Belzunce, 2001).

Cabe destacar que el acero es una aleación de hierro y carbono, este último presente alrededor de un 0,05% hasta un 2% en donde algunas ocasiones se agregan otros tipos de elementos (níquel o cromo) para propósitos específicos. En cuanto a las fundiciones el porcentaje de carbono es mayor al 2%, que en contraparte del acero son quebradizas, además de no ser posible forjarlas, sino que es necesario un moldeo (CAP, 2000).

2.2.5.1 Fases y constituyentes de importancia metalográfica. De acuerdo a su composición metalográfica las aleaciones de hierro-carbono presentan diferentes microconstituyentes, denominados: ferrita, cementita, perlita, austenita, martensita, troosita, sorbita, bainita, ledeburita, grafito, entra otras (Universidad Autonoma de Madrid, 2004).

- **Ferrita:** Como se mencionó anteriormente, la ferrita es hierro alfa en donde puede existir presencia en pequeñas cantidades de silicio, fosforo y otras impurezas. Referente a sus propiedades mecánicas se conoce que la resistencia es aproximadamente 28 Kg/mm², 35 % de alargamiento y una dureza de 90 HB. En comparación con los otros constituyentes es el más blandos de todos, además de ser dúctil y poseer propiedades magnéticas (ver Figura 10) (Apraiz, 1949).

- **Cementita:** Está considerado como uno de los materiales más duro y frágil de los aceros al carbono, con una dureza por encima de 68 Rockwell-C con una microestructura de

forma paralelepípedo ortorrómbico de gran tamaño. La cementita es un carburo de hierro con un contenido de 6,67% de carbono y 93,33% de hierro (Apraiz Barreiro, 1949).

- **Perlita:** Este es un tipo de constituyente eutectoide en el cual se encuentran combinadas por capas o láminas de ferrita y cementita. La distancia entre las láminas depende de la velocidad de enfriamiento, donde con una velocidad de enfriamiento de manera rápida se logran laminas muy cercanas donde aún con grandes aumentos en un microscopio no se puede diferenciar una de otra. De acuerdo a la distancia entre capas se puede clasificar la perlita en gruesa, normal y fina (Apraiz Barreiro, 1949).

En la Tabla 3 se muestran algunos valores importantes de los diferentes tipos de perlita.

Tabla 3

Clasificación de la perlita

Tipo de perlita	Distancia entre laminas (μm)	Dureza (Brinell)	Enfriamiento
Gruesa	400	200	Lento dentro de un horno
Normal	350	220	Bastante rápido dentro del horno o al aire
Fina	250	300	Al aire

Nota: Para observar con claridad las laminillas de la perlita gruesa, suele ser necesario emplear unos 500 aumentos. Fuente: Autor 2019.

En la figura siguiente figura 10, se muestra una microestructura en la cual está presente la perlita y la cementita en un acero, después de aplicar un tratamiento térmico de recocido.

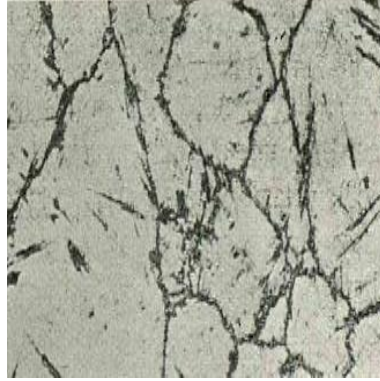


Figura 10. Cristales blancos de perlita y retícula negra de cementita en un acero de 1,10% de carbono recocido. Fuente. (Apraiz, 1949).

- **Austenita:** Es el constituyente más denso de los aceros, además de poseer una gran resistencia al desgaste. Como se citó anteriormente es la fase sólida del carbono presentada en el hierro gamma, donde el porcentaje carbono puede estar presente en el rango de 0 a 1.7%, es decir, su composición variable. En cuanto a sus propiedades la resistencia tiene intervalo de valores desde 88 a 105 Kg/mm², con una dureza Brinell de 300 y con un alargamiento en el rango de 20 a 23%. Cabe resaltar que es poco magnética, blanda, muy dúctil y tenaz (Apraiz, 1949, p.15).

- **Martensita:** El contenido de carbono presente en la martensita llega hasta un 0.9%, por lo tanto, sus propiedades físicas varían de acuerdo a la cantidad presente de carbono, ya que al aumentar el contenido del mismo aumenta su dureza, resistencia y fragilidad. Se encuentra principalmente en los aceros y fundiciones templadas, y está formado por una solución sólida sobresaturada de carbono en hierro alfa. Es un constituyente magnético, que posee una resistencia entre 170 a 250 Kg/mm², con un rango de dureza entre 50 a 68 Rockwell-C, alargamiento entre 2.5 a 0.5% (Apraiz, 1949, p.27).

- **Troosita:** Este tipo de constituyente aparece en los aceros templados y revenidos realizados a temperaturas menores de 400 °C, y en el corazón de piezas de gran tamaño

templadas en agua, y de menor tamaño a las sometidas por temple en aceite. Se presenta una combinación fina de cementita y ferrita, que es ocasionada por el enfriamiento de la austenita a velocidad inferior a la crítica de temple. Sus propiedades esta entre los valores presentes en los constituyentes de la martensita y la sorbita, teniendo un resistencia entra 140 a 175Kg/mm², dureza entre 400 a 500 Brinell, y alargamiento de 5 a 10%, siendo además magnética (Apraiz, 1949, p.29).

- **Sorbita:** Es el constituyente con la mayor resiliencia presente en los aceros, constituido por cementita y ferrita. Es obtenido al enfriar la austenita, martensita o troosita a velocidad inferior a la crítica de temple entra 400 y 700 °C. En cuanto a sus propiedades tiene una resistencia entre 88 a 140 Kg/mm², dureza entre 250 a 400 Brinell y un alargamiento entre 10 y 20% (Apraiz, 1949, p.24).

- **Bainita:** Para la obtención de la bainita se necesita enfriar rápidamente la austenita manteniendo la temperatura constante hasta que toda la austenita sea convertida en bainita. Esta transformación tiene lugar en un rango de temperaturas entre 250 a 550 °C. (Universidad Autonoma de Madrid, 2004).

- **Grafito:** Este tipo de constituyente aparece cuando las aleaciones de hierro carbono superan el 2% de carbono. La matriz de grafito tiene una gran dureza, es decir, entre más grafito mayor dureza, pero al mismo tiempo muy frágil. En las fundiciones grises se encuentran presentes en formas de escamas siendo las que más resaltan en su microestructura. La presencia de grafito permite una buena maquinabilidad además de buena capacidad de amortiguación (Puente, 2010).

En la siguiente Tabla 4 se las describe brevemente las características de las fases a partir de la aplicación de tratamientos térmicos, generalmente en los aceros existe gran diferencia entre sus propiedades y características dependiendo de la composición química, las fases y constituyentes en la microestructura.

Tabla 4

Características de las fases

Fase	Estructura de la fase	Características
Ferrita	BCC	Fase de equilibrio de baja temperatura, relativamente blanda
Cementita Perlita	Ortorrómica compleja	Fase metaestable, de alta dureza Mezcla laminar de ferrita y cementita
Austenita	FCC	Fase de equilibrio estable a temperatura media, relativamente blanda
Martensita	BCT (solución sobresaturada de carbono en ferrita)	Fase metaestable de alta dureza, la morfología depende del % de carbono
Bainita		Microconstituyente metaestable duro. La dureza aumenta cuando desciende la temperatura de formación
Grafito	Hexagonal	Fase de equilibrio, estable

Fuente: (Yu Lajtin, 1973).

2.2.6 Tratamientos térmicos. Para efectuar un tratamiento térmico el material deberá pasar por varias etapas de calentamiento y enfriamiento de manera controlada, para lograr cambios en su microestructura, constituyentes estructurales y granulometría. La finalidad de la aplicación de cualquier tratamiento térmico es obtener unas propiedades mecánicas específicas para cada aplicación o uso. Las aplicaciones más comunes son el recocido que es usado para ablandar el material y por consiguiente es formado de manera más fácil a una alta temperatura, además de ser usado para aliviar las tensiones generadas internamente. También

puede ser aplicado luego de haber pasado por el proceso de manufactura para lograr una mayor resistencia y dureza (Escuela de Ingeniería Julio Garavito, 2008).

En la siguiente figura 11, se muestra una línea de producción en la cual las piezas se encuentran sometidas a tratamientos térmicos, en este caso el proceso de calentamiento.



Figura 11. Piezas sometidas a calentamiento en algún tratamiento térmico. Fuente. (Insertec, 2016).

En los cambios de temperaturas presentados en los tratamientos térmicos se presentan transformaciones de la microestructura y cambios en las propiedades del metal podemos encontrar podemos distinguir 3 diferentes procesos como lo son: reblandecimiento, endurecimiento y tratamiento de superficies. En el proceso de reblandecimiento se busca liberar los esfuerzos por medio del recocido o normalización, en tanto al endurecimiento se encuentran los procesos como templado en matriz con presencia de martensita y austenita. Y por último en referencia al tratamiento de superficies es logrado con la aplicación de la nitruración, cianuración, carburación y endurecimiento por inducción. El conjunto de estos procesos busca mejoras en las propiedades del material sometido a los diferentes tratamientos térmicos como lo son aumentar la dureza y resistencia, además de su ductilidad y una mejora en la facilidad de maquinado, también abarca aplicaciones de endurecimiento de

herramientas y modificación de las propiedades tanto eléctricas como magnéticas presente en los materiales (Perez Patiño, 1996).

En la siguiente figura 12 se muestra el proceso de recocido en una lámina de acero en la cual se busca eliminar las tensiones internas generadas por un tratamiento térmico aplicado anteriormente.



Figura 12. Tratamiento térmico de recocido. Fuente: (Censa Industrial, 2017)

2.2.6.1 Templado. *La fundición nodular o hierro dúctil puede ser endurecido por calentamiento arriba de la temperatura de transformación crítica alrededor de 900 °C. Con el uso del tratamiento térmico de templado se obtiene una matriz de estructura martensítica que de acuerdo a sus valores citados anteriormente es uno de los constituyentes con mayor dureza, óptima para la mejora deseada en la fundición nodular a utilizar. Este proceso se puede realizar por medio de temple en aceite o agua, siendo este factor, es decir, el de enfriamiento el que determine la severidad del temple, factor determinante para evitar la descomposición térmica por temple. Este tratamiento térmico es obtenido por medio de calentamiento aplicando temperaturas por encima de la crítica, es decir, alrededor de los 900 °C. Las durezas alcanzadas están entre el rango de valores de 500 a 580 Brinell. Este*

proceso también es utilizado para liberar esfuerzos por medio de inducción de temple, aplicando temperaturas entra 232 a 260 °C (Bello, 1985).

La velocidad de enfriamiento juega un papel muy importante en la formación de la microestructura, debido a que el temple en agua supera la velocidad crítica, por lo tanto, se ocasiona distorsión o fisuras ya que en el proceso de transformación de la martensita se presenta una expansión notable del volumen. Esto origina unas fuerzas internas y en conjuntos con las contracciones térmicas son las causantes de las fisuras. Citado lo anterior como lo menciona (Yu Lajtin, 1973) el mejor proceso para el templado es el obtenido por medio de temple en aceite. La dureza alcanzada por las fundiciones grises luego de aplicado el templado llega a valores entra 48 a 55 Rockwell C, variando el valor según la cantidad y tamaño de láminas de grafito en tanto que las nodulares alcanzan valores de dureza entra 53 a 58 Rockwell C, además de que su resistencia al desgaste es mucho mayor que las presentadas en los aceros de alto carbono endurecidos (Yu Lajtin, 1973).

La finalidad del templado es aumentar la dureza del material, es necesario obtener una microestructura de forma martensítica, esto se logra con la aplicación de tratamientos térmicos en conjunto como el templado y revenido, que generalmente son los últimos tratamientos térmicos a aplicar para adquirir las propiedades deseables y requeridas (Puente, 2010).

Las temperaturas recomendables para el temple de los aceros al carbono son las que se señalan en la siguiente Tabla 5.

Tabla 5

Temperatura en grados centígrados para temple de los aceros según % C

Composición % de C	Temperatura °C
0,10	925
0,20	900
0,30	870
0,40	840
0,50	830
0,60	810
0,70	780
0,80	770
0,90	770
1,00	760
1,20	760
1,40	760

Fuente: (Apraiz, 1949)

Teniendo en cuenta la tabla anterior se puede deducir que en cuanto aumenta el contenido de carbono en los aceros, se disminuye la temperatura necesaria para el proceso de temple, dicho esto como las fundiciones tienen un contenido de carbono superior al 2% la temperatura de templado no será superior a los 925 °C.

Según lo indica (Castillo, 2012) el procedimiento de calentamiento realizado en la práctica debe ser de manera que el material se caliente en conjunto con el horno, y no calentar el horno para posteriormente introducir el material, siendo este relativamente lento y uniforme hasta la temperatura requerida. Además de recomendar un tiempo de una hora por cada 25mm de espesor del material debido a que es una medida de seguridad. Las velocidades de calentamiento muy elevadas ocasionan grandes esfuerzos, mayormente cuando son piezas de formas complejas e irregulares, siendo este uno de los factores que afectan el comportamiento de una muestra de acero durante el proceso de calentamiento, acompañada de la conductividad térmica, la naturaleza de la atmosfera en el horno y el espesor de la sección.

Mecanismo de enfriamiento de temple: Otro factor determinante en un buen templado con características óptimas de dureza y resistencia es la velocidad de enfriamiento desarrollada en el proceso, donde si se presenta una velocidad de enfriamiento superior a la crítica se obtendrá una microestructura martensítica donde se presenta la mayor dureza, mientras que si la velocidad es menor esta microestructura cambia a bainita o perlita fina. Para un templado con grandes propiedades de dureza es necesario una velocidad de enfriamiento superior a la crítica, donde al acero se endurece completamente, caso opuesto en el caso contrario. Según lo mencionado es preciso identificar las formas en que se presenta la extracción de calor durante el temple (Castillo, 2012).

Se reconocen cuatro etapas del mecanismo de extracción de calor durante el templeado:

I. Etapa A': Etapa de conducción inicial del líquido. Al introducir la pieza en el medio de temple se formarán unas burbujas de vapor, las cuales ocurren después de aparecer una capa de vapor que cubre toda la pieza. Todo esto ocurre en un tiempo cercano a los 0.1 segundos.

II. Etapa A: Etapa de enfriamiento por medio de una capa de vapor. En esta etapa se vaporiza el medio de temple que se encuentra en la superficie del metal, debido a la formación de una capa de vapor estable la cual rodea todo el metal candente.

III. Etapa B: Etapa de enfriamiento por transporte de vapor. Llega un momento en que la temperatura ha disminuido tanto que la capa de vapor ya no es estable, por lo tanto, empieza a fracturarse. Es ahí donde el líquido usado para el medio de temple entra en ebullición y el calor es transferido desde la pieza de manera muy rápida de forma de calor latente de vaporización. Aquí es donde se produce el enfriamiento más rápido respecto a las 4 etapas.

IV. Etapa C: Etapa de enfriamiento por medio del líquido. La última etapa y más lenta en el proceso de enfriamiento ocurre cuando la superficie del metal es igual a la temperatura de ebullición del líquido, y al seguir bajando la temperatura se deja de formar vapor, y la transferencia de calor queda solo presente por convección y conducción.

Transferencia térmica durante el temple: El objetivo del temple es lograr una estructura martensítica, y para esto es necesario un enfriamiento rápido luego de que la pieza haya alcanzado su temperatura de austenización, enfriamiento el cual es realizado en un medio de temple ya sea agua o aceite. La transferencia de calor ocurrida en el momento de introducir la pieza en el medio líquido que está a temperatura ambiente, nos produce una ebullición del líquido utilizado, y termina dicha ebullición en el momento que la pieza de metal alcanza o es menor que la temperatura de ebullición, quedando como resultado la transferencia de calor solo por convección y conducción. A la hora de analizar matemáticamente la transferencia de calor es necesario tener en cuenta los flujos de calor presentes en sus distintas formas. Como primer medio de transferencia de calor nos encontramos con el flujo de calor que es dirigido desde la superficie del metal hasta el medio líquido utilizado para el temple, el cual es el encargado de controlar la temperatura del metal. Y como segundo medio tenemos la transferencia de calor presentada en el interior de la pieza que es presentada por conducción, regida por la difusividad térmica propia del material empleado, y se presenta que el flujo de calor presentado en la superficie de la pieza es el mismo transferido al líquido de temple.

Para el análisis de la transferencia de calor se recurre a la Ley de enfriamiento de Newton, donde h es el coeficiente de película T_s la temperatura de la superficie de la pieza y T_∞ la temperatura del medio de temple utilizado, que en la mayoría de casos es a temperatura ambiente.

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_s = h(T_s - T_\infty)$$

Al momento de analizar el flujo de calor en cualquier coordenada la pieza de metal, se utiliza la ecuación de conducción de calor, donde encontraremos a la conductividad térmica del material representado por la letra k, la ecuación es la siguiente.

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_s = k \left(\frac{dT}{dX}\right)_s$$

Y por último podemos igualar ambos flujos térmicos, y obtenemos la siguiente expresión.

$$\left(\frac{dT}{dx}\right)_s = \left(\frac{h}{k}\right)(T_s - T_\infty)$$

Analizando la ecuación obtenida al igualar los flujos térmicos obtenemos que la velocidad de la transferencia de calor ocurrida en la superficie de la pieza es directamente proporcional al cociente h/k. Es ahí donde aparece el termino severidad de temple (H) que me indica la capacidad o efectividad del medio de temple o refrigerante utilizado (Belzunce Navarra, 2001).

La severidad de temple (H) también puede ser definido como la habilidad del medio de temple para extraer calor de la pieza a alta temperatura, y es expresado en valores donde H=1 es asignado para el agua sin agitación, y de ahí se asignan los valores para los otros líquidos que pueden ser utilizados como medio de temple.

Los valores de H varían mientras avanza el proceso de enfriamiento, pero se usan valores aproximados para cada medio de temple, como se muestra en la Tabla 6 (Castillo Rodriguez, 2012).

Tabla 6

Severidad de temple

Medio de temple	Aire	Aceite	Agua	Salmuera
No agitación de fluido	0.02	0.25 – 0.30	0.9 – 1.0	2
Agitación en templado	-	0.30 – 0.35	1.0 – 1.1	2 – 2.2
Agitación moderada	-	0.35 – 0.40	1.2 – 1.3	-
Buena agitación	-	0.4 – 0.5	1.4 – 1.5	-
Agitación fuerte	0.05	0.5 – 0.8	1.6 – 2.0	-
Agitación violenta	-	0.8 – 1.1	4	5

Nota: Unidades dadas pulg-1. Fuente. (Castillo Rodriguez, 2012).

2.2.6.2 Revenido

El tratamiento térmico de revenido es comúnmente empleado luego de aplicar un templado, debido a que después del proceso de temple las piezas de aceros quedan muy duras y frágiles, lo cual en muchas ocasiones dificulta el maquinado, por lo tanto, se aplica el revenido para disminuir dicha dureza y la resistencia, a su vez que aumenta la tenacidad y en mínima cantidad elimina las tensiones internas de la pieza posterior al templado. Pero esto no quiere decir que el revenido elimine las propiedades adquiridas por el material cuando se le aplico el temple, sino que las modifica. Esto se logra llevando el material a una temperatura menor que la crítica (Ac1), y posterior el proceso de enfriamiento puede ser efectuado al aire a temperatura ambiente, agua o aceite (Apraiz, 1949).

En la siguiente figura 13 se muestra una gráfica que se representa las temperaturas a calentar la pieza en los tratamientos térmicos de templado y revenido, teniendo como referencia las temperaturas críticas del diagrama Fe-C.

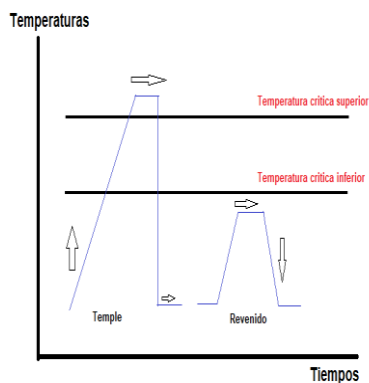


Figura 13. Grafica T v t de temple y revenido. Fuente. Modificado de (Apraiz, 1949).

Luego de aplicado el proceso de temple como se mencionó anteriormente es obtenido una matriz martensítica que posee una solución sólida sobresaturada de carbono, y durante el proceso de revenido esta pierde carbono. Luego de aplicar este conjunto de tratamiento térmicos también llamados bonificado se encuentra en el material una estructura de matriz de ferrita con una dispersión de diversos carburos. Al poseer una estructura ferrita se presenta una contracción dimensional, además de un cambio en sus propiedades mecánicas en tanto a un aumento de la tenacidad, pero una pérdida de dureza y resistencia mecánica (Belzunce, 2001).

El rango de temperaturas depende de la propiedad deseada para el material, estas propiedades pueden ser dureza, tenacidad, resistencia al desgaste entre otras, por lo tanto, en la Tabla 7 se muestran los rangos de temperatura para aplicar el revenido.

Tabla 7.

Rango de temperatura del revenido

Rango de Temperatura (°C)	Propiedades adquiridas
200 - 450	Dureza y tenacidad moderada
< 200	Alta dureza y resistencia al desgaste
> 450	Alta tenacidad

Fuente: Autor 2019.

Estas propiedades ilustradas en la Tabla 7, son obtenidas debido a las diferentes estructuras adquiridas por la matriz en las piezas según el rango de temperatura aplicado. Cuando se asigna una temperatura inferior a los 200 °C y mayor a los 40 °C se obtendrá una estructura de tipo martensita negra, llamada así debido a su tonalidad negra, y en tanto a la modificación de sus propiedades se eliminan los esfuerzos internos. Cuando el rango de temperatura esta entre los 200 y 450 °C, la martensita obtenida en el temple es transformada en ferrita y cualquier austenita presente se transforma en bainita. Presentando una masa negra. Sus propiedades mecánicas se modifican, al tanto que se obtiene una resistencia mayor de 200,000 Psi, una dureza entre 40 y 60 Rockwell C, un aumento en su ductilidad, pero una baja tenacidad. Por último, tenemos cuando se aplica el revenido en un rango entra 450 y 650 °C, donde se aprecia un aumento de cementita, y al mismo tiempo aumenta la cantidad de ferrita la cual predominara la matriz de la pieza. Sus propiedades mecánicas varían, adquiriendo una resistencia a la tensión entre 125,000 – 200,000 Psi, una dureza en el rango de 20 – 40 Rockwell C. Cuando es asignada una temperatura mayor a los 650 °C se obtienen partículas de cementita globular parecida a la estructura del cementita esferoidal. Se tiene una estructura muy suave y tenaz (Castillo, 2012).

En la siguiente figura 14 se muestra la microestructura obtenida en un acero luego de aplicados tratamientos térmicos como austenizado, templado y revenido en el cual se observan agujas de martensita (negras) en un matriz de austenita (blanca).



Figura 14. Acero para herramientas AISI H13 (0,9 % C, 1 %, 1 % Mn, 0,50 % Cr, 0,50 % W austenizado a 980° C, templado en aceite y revenido a 218° C). Fuente. (Va Larre, 2000).

En el revenido de algunos aceros aleados, cuando su rango de temperatura esta entre 540 y 675 °C se presenta un inconveniente llamando “fragilidad de revenido” donde su capacidad de recuperar su forma luego de ser sometido a una fuerza ya sea de compresión, estiramiento o flexión disminuye, esta capacidad o propiedad es llamada resiliencia. Para que esto ocurra la pieza debe ser enfriada lentamente, es decir, al aire a temperatura ambiente, no obstante, su tenacidad es igual a la obtenida cuando se enfría en agua (Perez, 1996).

Lo que ocurre en la estructura de la martensita obtenido luego del temple al aplicar el revenido es la derivación de partículas de carburos de la estructura metaestable, obteniendo una microestructura más blanda y tenaz (Yu Lajtin, 1973).

En la siguiente figura 15 se observa el cambio de las propiedades luego de aplicado el tratamiento térmico de revenido a un acero SAE 1050.

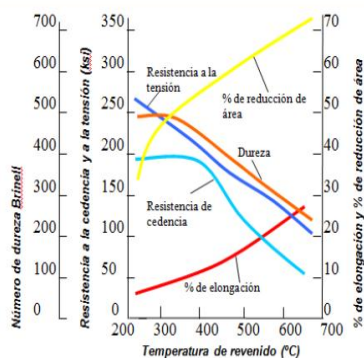


Figura 15. Efecto de la temperatura de revenido sobre las propiedades de un acero SAE 1050. Fuente: (Escuela de Ingeniería Julio Garavito, 2008).

Efecto del tiempo en el revenido: La aplicación del revenido tiene repercusiones en cuanto al tamaño y número de partículas dispersas, ya que para aumentar el tamaño y disminuir su variación es necesario que la temperatura este constante por un rango de tiempo luego de ser sometido al proceso de templado. En la figura 16 se puede observar que cuando la temperatura se aumenta la dureza del material se reduce, en este caso el material es un acero al carbono. Los resultados obtenidos fueron de una prueba realizada a un acero que fue previamente templado con un contenido de 0,62%C y sometido al tratamiento térmico de revenido por una hora, donde la dureza fue medida tanto en Rockwell C como también dureza Brinell, obteniendo como valores más altos 68 y 640 respectivamente.

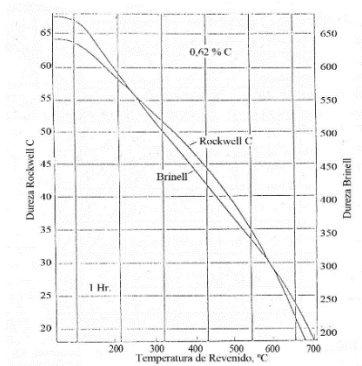


Figura 16. Efecto del revenido en la dureza de un acero de 0,62% C templado, realizado durante 1 hora a varias temperaturas. Fuente. (Yu Lajtin, 1973)

2.2.6.3 Recocido. El tratamiento térmico de recocido en muchos casos es el último en aplicar debido a las propiedades que este otorga, ya que al aplicarlo a fundiciones grises o nodulares se puede reducir aún más su dureza y por consiguiente mejorar su maquinabilidad, además de aliviar tensiones, incremento en la ductilidad y resistencia al impacto. Cuando se aplica el recocido a las fundiciones desaparece el contenido de carbono en la matriz y solo queda presente ferrita y grafito. El objetivo del recocido es obtener una mejor maquinabilidad logrando un mayor ablandamiento del material pero conservando altos valores de resistencia (Yu Lajtin, 1973).

Con el recocido lo que se logra es poder eliminar las tensiones que fueron provocadas en distintos procesos, ya sea de moldeo, trabajo en frío o en los tratamientos térmicos anteriores como templado y revenido (Pinto, 2010).

A continuación, se detallan los diferentes tipos de tratamientos de recocido en fundiciones de hierro

Recocido de alta temperatura o de grafitización: Este tipo de recocido es utilizado cuando se pretende lograr un gran ablandamiento del material, obteniendo una

microestructura predominante de grafito, ferrita y algo de perlita. Esto se logra cuando se lleva al material a una temperatura mayor a la del rango crítico por un tiempo considerable y posteriormente un enfriamiento lento. En algunos materiales como la fundición nodular con un contenido de silicio entre 1,5 a 2,5% se puede encontrar carburo de hierro en forma de perlita, que únicamente puede ser grafitizado a temperaturas iguales o mayores al rango crítico (Yu Lajtin, 1973).

Las precauciones y condiciones de proceso en la grafitización para fundiciones grises y nodulares son las siguientes:

a) *Velocidad de calentamiento:* Para evitar grandes diferencias en el gradiente de temperatura el aumento no debe ser mayor a 110 °C/h teniendo como partida la temperatura ambiente, en el caso de grandes fundiciones con detalles gruesos es recomendable precalentarlas en el rango de 400 – 500 °C, para luego llevarla a la temperatura de austenización.

b) *Tiempo a temperatura:* Es necesario mantener por unos tiempos considerables el material a las temperaturas previamente establecidas, esto para lograr una completa grafitización, por lo tanto, en fundiciones grises y nodulares es recomendado mantener la pieza de 1 a 3 horas, además de mantenerlo una hora más por cada 25mm de espesor.

c) *Velocidad de enfriamiento:* Para que pueda obtenerse al final una completa grafitización es necesario una velocidad de enfriamiento lenta, además para evitar tensiones internas que son ocasionadas por los altos gradientes de temperatura, que a su vez afectan a las propiedades mecánicas finales del material. Por lo tanto, es recomendado que se enfríe en un

horno a razón de 50 °C/h hasta llegar a una temperatura por debajo de los 300 °C, y posteriormente al aire libre hasta llegar a la temperatura ambiente (Yu Lajtin, 1973).

Normalizado: Es utilizado para para mantener la resistencia a la tracción y al desgaste, pero a diferencia del mencionado anteriormente este es enfriado al aire cuando se encuentra a una temperatura mayor a la del rango crítico, puede ser ayudado por medio de un ventilador o cualquier otro medio que sea capaz de forzar la circulación del aire. En cuanto al tiempo de permanencia en el horno y calentamiento es igual al de recocido de altas temperaturas.

Recocido de media temperatura: Este tipo de recocido se diferencia de los dos mencionados anteriormente en su menor tiempo de permanencia en la etapa de calentamiento, es decir, hasta llevarlo a su temperatura de austenización y mantenerlo ahí, ya que largos tiempos en la etapa de calentamiento podrían ocasionar oxidación en la superficie y distorsión en la fundición. Es aplicado cuando hay ausencia de carburos masivos o los hay, pero en mínimas porciones y de manera desordenada, y se logra llevándolo a una temperatura un tanto mayor a la del rango crítico que oscila entre 815 y 890 °C.

Recocido de temperatura baja o ferritizado: Es utilizado para convertir la matriz perlítica en ferrita y grafito en las fundiciones gris y nodular, se lleva hasta una temperatura inferior al rango crítico, es decir, una temperatura comprendida en el rango de 730 – 790 °C, y manteniéndola ahí de acuerdo a su espesor, ya que se mantendrá 1 hora por cada 25mm de espesor de la pieza para posteriormente enfriarla a razón de 45°C/h (Yu Lajtin, 1973).

En la Tabla 8 se muestra una tabla donde se aprecia una comparación de las características del recocido de varias fundiciones grises, con la adición de diversos aleantes con contenido de distintos materiales como cromo, níquel, molibdeno entre otros.

Tabla 8

Influencia del recocido de ferritización a 760°C, en tanto a dureza y resistencia a la tracción.

Numero de fundición	Aleantes adiciones a la fundición base (%)					Material después de la fundición		Recocidos	
	Cr	Mo	Cu	Ni	V	HB	Resistencia a la tracción (Mpa)	HB	Resistencia a la tracción (Mpa)
1	Hierro base sin aleantes					217	253	143	191
2	0,6	0,56	-	-	-	262	318	217	307
3	0,5	-	0,52	-	-	241	296	201	263
4	-	0,54	0,65	-	-	269	361	187	258
5	0,49	-	-	1,45	-	255	312	156	240
6	-	-	-	-	0,12	229	282	156	215
7	-	-	1,8	-	-	235	300	143	206

Nota: Material usado es la fundición gris con composición químicas bases de C= 3.26%, Si=1.92%, Mn=0.94%, S=0.03%, P=0.11%. Fuente. Modificado de (Lajtin Yu., 1973)

De acuerdo a la figura anterior se puede apreciar que con la adición de diversos aleantes al contenido del material, en este caso cromo y molibdeno se puede obtener el valor más alto en tanto a la resistencia a la tracción con un valor de 307 MPa luego de aplicado el tratamiento térmico de recocido. En tanto a la dureza su valor mínimo luego de ser recocido es el presentando en aquel material base sin la adición de ningún aleantes, no obstante, cuando se añade cobre se mantiene la misma dureza de 143 HB y una resistencia mayor de 206 MPa, en tanto a la presentada cuando no se añade algún tipo de aleantes es de 191 MPa.

Recocido de fundiciones aleadas: Cuando en los materiales se encuentran uno o varios elementos como cromo, molibdeno, vanadio, magnesio entre otros hay una obstrucción en el proceso de ablandamiento del material que es propiciado por el recocido. En este caso es necesario un aumento notable de la temperatura, así como en el tiempo que se debe mantener a dicha temperatura en comparación con las no aleadas.

Recocido total: Cuando se pretende alcanzar varias mejoras en las propiedades como lo son las propiedades eléctricas, magnéticas además del maquinado y cierta suavidad es aplicado el recocido total. Se basa en calentar la pieza a una temperatura cercana al rango crítico y mantenerla por un tiempo considerable, para posteriormente dejarla enfriar de manera lenta en el horno (Yu Lajtin, 1973).

(Perez, 1996) muestra en su trabajo experimental un acero de grano grueso con un contenido de carbono de 0,2%, analizando su proceso de transformación, el cual comienza cuando es calentado el material hasta una temperatura superior a la línea que muestra la temperatura crítica inferior (A1) y ocurre la transformación de perlita en pequeños granos de austenita debido a la reacción eutectoide, pero se mantiene los granos de ferrita (*b*). A medida que la temperatura aumenta entre las líneas A1 y A3 los grandes granos de ferrita son modificados por pequeños granos de austenita, es decir, por encima de la línea A3 solo existirá la austenita (*c*), cuando comienza el proceso de enfriamiento se aprecia la aparición de granos de ferrita proeutectoide y zonas de perlita laminar (*d*), y menciona que la temperatura óptima de recocido para los aceros es aproximadamente 10°C por encima de la línea que delimita la temperatura crítica superior (A3). Y se concluye que cuando se calienta por encima de la línea A1 aparecerán unos granos gruesos austeníticos, que a medida que se enfrían se transforman en grandes áreas perlíticas. En la figura 17 se muestra los cambios en

la microestructura conforme aumenta y disminuye la temperatura como se mencionó anteriormente.

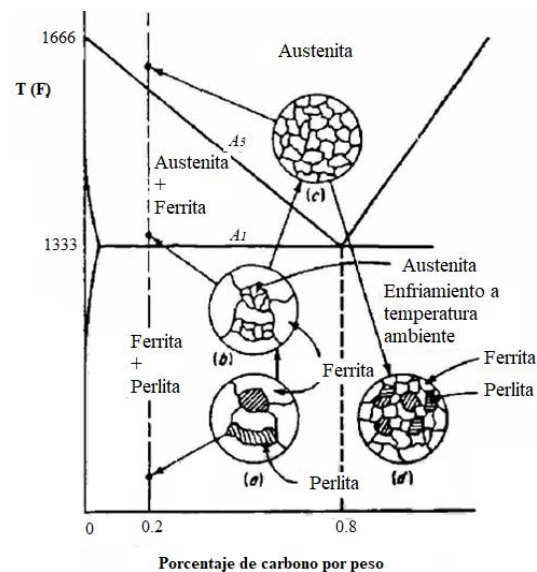


Figura 17. Representación esquemática de los cambios en microestructura durante el recocido de un acero al 0.20% de carbono, (a) Estructura original, ferrita y perlita de grano grueso, (b) justo por encima de la línea A1, la perlita se ha transformado en pequeños granos de austenita y la ferrita no ha cambiado. (c) Por encima de la línea A3; solo austenita de grano fino y pequeñas áreas perlíticas. Fuente. (Pérez, 1996).

2.2.6.3.1 Propiedades de fundiciones nodulares recocidas. Uno de los factores más importantes en una pieza que será sometida a cambios de forma y tamaño es su maquinabilidad, es por eso que se utiliza el recocido en fundiciones y aceros para lograr incrementar su maquinabilidad disminuyendo su dureza, pero en contraste a eso se ven afectadas otras propiedades como lo son el límite elástico, la resistencia a la tracción, al impacto y al desgaste pero que no afectan tanto al producto final (Yu Lajtin, 1973).

En la siguiente Tabla 9 se detallan las prácticas mencionadas anteriormente y se resumen las diferentes temperaturas y tiempos para cada tipo de recocido aplicado a las fundiciones nodulares.

Tabla 9.

Prácticas recomendadas para recocidos de fundiciones nodulares

Tipo de recocido	Propósito	Temperatura	Tiempo	Velocidad de enfriamiento
Baja temperatura (ferritizado)	Ausencia de carburos, para obtener grados 60-45-12	720 – 732°C	1h por cada 25mm de espesor	Enfriamiento en el horno hasta aprox 300°C
Media temperatura	Ausencia de carburos, para obtener grados 60-40-18	870 – 925°C	2h mínimo	Enfriamiento en el horno hasta aprox 300°C
Alta temperatura	Presencia de carburos, para obtener grados 60-45-12 y 60-40-18	915 – 930°C	2h mínimo	Enfriamiento en el horno hasta aprox 700°C y mantener 2h para seguir enfriando en el horno
Normalizado y revenido	Presencia de carburos, para obtener grados 100-70-06 y 80-55-06	900 – 930°C	2h mínimo	Enfriamiento al aire

Fuente: Lajtin Yu.M (1973)

Una estructura con óptimas propiedades para su maquinabilidad debe poseer una microestructura ferrítica con láminas de grafito de forma desordenada, lo cual se logra con un recocido total. Cuando es aplicado a las fundiciones nodulares se obtiene una matriz ferrítica con una maquinabilidad la cual es superior a cualquier fundición con otro tipo de estructura (Yu Lajtin, 1973).

2.2.7 Problemas de los tratamientos térmicos. Teniendo en cuenta los fenómenos metalúrgicos presentados durante la aplicación de los distintos tratamientos térmicos a las fundiciones nodulares, se pueden presentar los siguientes inconvenientes (Bello Moreno, 1985).

- Pueden ocurrir cambios en las tolerancias dimensionales cuando la cementita es transformada en ferrita, debido a que pueden expandir algunas partes del material
- Presencia de costras en las fundiciones luego del recocido, ya que la resistencia del hierro es muy baja a altas temperaturas.
- Piezas frágiles si se presentan grandes gradientes de temperaturas y variaciones repentinas de temperatura.

2.3 Marco Teórico

2.3.1 Hierro dúctil o nodular. El hierro nodular tiene una microestructura ferrítica, es decir, un cambio de estructura donde existe una modificación en sus propiedades con una mayor resistencia y límite elástico, además de ser más fuerte en comparación con el hierro gris. Se produce mediante la adición medida y vigilada de magnesio en el hierro fundido además de pequeñas cantidades de azufre y fósforo (Bombas mejoradas, 2016).

Las mejores propiedades de la fundición nodular en comparación con una fundición gris son presentadas por las diferentes matrices que tienen cada una. La nodular posee una estructura de colada con cantidades de grafito que tienen forma de nódulos esferoidales contenidos en una matriz metálica dúctil, en tanto la fundición gris presenta una microestructura con hojuelas de grafito. Debido a esto la fundición nodular presenta una resistencia y grado de ductilidad mayor en contraste a la fundición gris, y pueden aun ser

mejoradas mediante diversos tratamientos térmicos (Fundinox Chile S.A., 2010). En la figura 18 se muestra la microestructura presente en una fundición nodular ferrítico-perlítico.

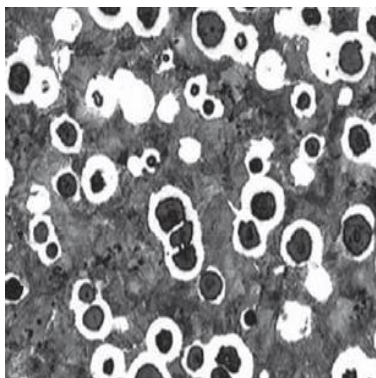


Figura 18. Estructura micrográfica típica de un hierro nodular ferrítico-perlítico.
Fuente. (Rizzo, 2014).

Dentro del hierro dúctil hay una amplia gama clasificados por grados designados de acuerdo a su matriz, pero tienen en general tienen en la microestructura una presencia de nódulos de grafito la cual es fundamental para la calidad y consistencia del material (Ductil Iron Society, 2013).

Obtención de la fundición nodular: En la microestructura de la fundición nodular hay como mínimo una presencia de 60% de partículas de grafitos que forman pequeños nódulos de forma esferoidal contenidos en una matriz metálica dúctil, que puede ser definido como hierro colado (Proaño, 2014).

El proceso de obtención de la fundición nodular consiste en tres etapas que son llamadas desulfurización, nodulación e inoculación. Y es durante la nodulación que se agrega un aditivo que contiene magnesio en un porcentaje alrededor de 0,04 a 0,06% en peso. Posteriormente es inoculado usando una aleación de silicio para luego ser vertido en el

molde. Para el calentamiento es generalmente usado un horno de cubilote (Fundinox Chile., 2010).

El proceso de nodulización es realizado añadiendo el nodulizante de magnesio a la cuchara de colada antes de que se vierta el material fundido para luego moldearlo. Las fundiciones nodulares tienen cantidades de carbono total alrededor de 3 a 4% y de silicio en un rango que varía entre 1,8 y 2,8%. Otros componentes presentes como el manganeso oscila entre 0,15 – 0,90%, en tanto el magnesio que es un elemento que me ayuda a la nodulización está presente entre un 0,1 a 1,0% (Bacon, 2008).

Para la formación del grafito esferoidal se siguen los siguientes pasos.

Desulfurización: Para la obtención de la fundición nodular es esencial escoger bien la materia prima que en muchos casos es el arrabio o mezclas de hierro líquido con algún agente desulfurante que puede ser carburo de calcio (CaC_2), ya que estos presentan bajos contenidos de carbono, elemento que ocasiona que el grafito se desarrolle en formas esféricas y no en forma de hojuelas, característica principal de la fundición nodular. Como se citó anteriormente, la fundición nodular generalmente es producida en un horno de cubilote donde es mezclada la materia prima y es distribuida de tal manera que se formen capas con un tamaño entre 30 y 40cm, además de añadir carbón de manera que se permutan para permitir un proceso continuo (Proaño Gueva, 2014).

Nodulación: En esta etapa es donde se busca eliminar cualquier presencia de azufre y oxígeno, esto es logrado con la adición de magnesio para propiciar el aumento del grafito esferoidal. Hay que tener en cuenta que no es pertinente añadir solamente el magnesio ya que si esto sucede el material final obtenido sería una fundición blanca, debido a que el magnesio blanquea la fundición, por lo tanto, es necesario el uso del agente inoculante. La adición de

magnesio debe ser realizada mediante una mezcla níquel-magnesio con un contenido de magnesio alrededor del 15%, para evitar la formación de humos y desprendimientos de metal. Es en la adición correcta del magnesio donde se presenta la mayor dificultad a la hora de la práctica, ya que es complicada la añadidura con el grado de consistencia y seguridad establecido. Se han realizado practicas donde mediante el uso de ciertas aleaciones cuaternarias de hierro-silicio-cobre-magnesio se puede evitar el uso del inoculante para poder formar la fundición nodular, y se probó que si el material no es vertido luego de la nodulación el hierro se convierte en fundición gris (Proaño, 2014).

Inoculación: El magnesio más el agente inoculante son los que me permiten la obtención del grafito esferoidal, el cual consiste en una aleación de silicio que es introducido momentos antes de verter el material en el molde correspondiente. El magnesio además de estabilizar los carburos efectúa durante la solidificación la conformación de fundición nodular (Proaño, 2014).

En la figura 19 se muestra el proceso de vaciado del metal fundido en otro recipiente donde se realizará el proceso de nodulización, paso necesario para la obtención de la fundición nodular.



Figura 19. Vaciado de metal fundido. Fuente. (Acosta & Martinez, 2000).

2.3.2 Composición y tipos de matrices de la fundición nodular. En cuanto a las proporciones de tamaño, redondez del grano y nódulos por mm² debe ser controlada de acuerdo a su composición química con valores de magnesio en el rango de 0,03 – 0,06% en peso. La microestructura presenta una matriz ferríticas, ferrítica-perlítica y totalmente ferrítica, y transformada a martensita revenida o ausferrita cuando es sometida a distintos tratamientos térmicos (Tamayo, 2016).

En la Tabla 10 se muestran los distintos tipos de matrices que pueden existir en las fundiciones nodulares, de las cuales depende la dureza del material. Según sea la matriz, será la dureza del hierro dúctil. Este hecho por sí solo, determina la gran importancia de la matriz, en el control de las propiedades mecánicas. Los tipos de matrices pueden ser:

Tabla 10

Diferentes tipos de matrices nodulares

Tipo de matriz	Principales características
Nodular ferrítica	Posee alta ductilidad, resistencia al impacto y tracción. Su estructura presenta esferoides de grafito en matriz de ferrita
Nodular ferrítica-perlítica	Buena maquinabilidad, las otras propiedades dependen del porcentaje en el que este distribuido la ferrita + perlita.
Nodular perlítica	Tiene una alta resistencia mecánica, resistencia al desgaste. Su microestructura está conformada por esferoides de grafito contenidos en una estructura perlítica
Nodular martensítica	Alta resistencia mecánica y al desgaste con baja ductilidad y tenacidad. Obtenida luego de aplicar templado y revenido hasta formar austenita
Nodular bainítica	Alta resistencia al desgaste y buena tenacidad. Obtenida por medio de tratamientos isotérmicos añadiendo elementos aleantes
Nodular austenítica	Buena resistencia a la corrosión y oxidación. Presenta una matriz totalmente austenítica.

Fuente: Modificado de (Rizzo Downes, 2014)

2.3.3 Propiedades de la fundición nodular o dúctil. En cuanto a las propiedades de la fundición nodular, los valores que más se solicitan para estudios mecánicos y de diseño son los de dureza, resistencia a la tracción, alargamiento entre otros. En la Tabla 11 se muestran dichas propiedades.

Tabla 11

Propiedades de la fundición nodular

Propiedad	Descripción	Valores
Módulo de elasticidad	Indica la relación que existe entre los incrementos de tensión aplicados en la prueba de tracción y los incrementos de deformación unitaria longitudinal	(62 – 170) GPa
Limite elástico	Tensión a la que el material comienza a sufrir una deformación plástica considerable	(275 – 620) MPa
Resistencia a la tracción	Carga máxima que puede soportar un material en tensión antes de que se fracture.	(414 – 1380) MPa
Dureza	Resistencia que opone un material a su deformación plástica superficial, ya sea por rayado o penetración. En este caso los ensayos fueron realizados por el método Brinell.	(149 – 700) HB
Resistencia al impacto	Resistencia de un material a la fractura por el choque o impacto de una carga	(440 – 480) MPa
Elongación	Aumento permanente de la longitud de una probeta sometida a tracción, se expresa en porcentaje sobre una medida ya establecida, y es medida al momento de la rotura de la probeta	(2 – 30)%
Densidad	Es la relación existente entre la masas y volumen de un material	(6,8 – 7,4) g/cm ³

Fuente: Modificado de (Rizzo, 2014)

La variación de los valores de las distintas propiedades de la fundición nodular tiene que ver con el tipo de matriz que tiene el material, ya sea una matriz ferrítica, martensítica entre otras. Que en muchos casos depende de la clasificación según sea su grado como se ve

en la Tabla 11, o de alguna modificación o mejora realizada por medio de algún tratamiento térmico.

2.3.4 Clasificación de las fundiciones nodulares. La clasificación de las fundiciones nodulares se realiza de acuerdo a la ASTM A-536, en la cual se toma en cuenta su resistencia y el alargamiento. En esta se establece 5 grados de acuerdo a sus propiedades mecánicas (Bacon, 2008).

En la siguiente Tabla 12, se muestran la clasificación de las fundiciones nodulares:

Tabla 12

Clasificación fundición nodular según la norma ASTM A-536

Grado	Alargamiento (%)	Dureza Brinell	Descripción	Usos
60-40-18	18	140-160	Ferrita; puede ser recocida	Resistente al impacto
65-45-12	12	143-207	Mayormente ferrítica; de colada o recocida	Servicios generales
80-55-06	6	187-255	Ferrítica-perlítica; Puede ser normalizada	Servicios generales
100-70-06	3	241-302	Mayormente perlítica; de colada o recocida	Resistencia al desgaste y tenacidad.
120-70-02	2	>>55 Rc	Martensítica; temple al aceite y revenido	La más tenaz y resistente al desgaste

Fuente: (ASTM interntational, 2014)

2.3.5 Aplicaciones de la fundición nodular o fundición dúctil. Debido a la presencia de grafito en forma nodular en la matriz de la fundición nodular, se evita la formación de capilaridad (capacidad de un fluido de bajar o subir por una superficie hueva “tubo”), evitando así fugas que podrían ser graves en tuberías con altas presiones. Por lo tanto, es

óptimo su uso en servicios de alta presión, por ejemplo, los cuerpos de compresores de múltiples etapas para fluidos gaseoso. En cuanto a la industria automovilística es usado en componentes o accesorios que tienen que ver con la seguridad como lo son las pinzas de freno, dirección, cajas diferenciales, bloque del motor, entre otros.

En comparación con la fundición gris, la fundición nodular presenta una serie de ventajas o mejores propiedades, debido a que presenta una fácil mecanizado, amortigua vibraciones, superficie relativamente dura, fiabilidad del servicio, además de contar con una amplia gama de tipos de fundición nodular, clasificada por grados que me permitiera elegir la resistencia apropiada para su uso (Ductil Iron Society, 2013).

En la figura 20, se muestra una válvula de mariposa fabricada con Hierro Nodular.



Figura 20. Válvula de mariposa fabricada con Hierro Nodular. Fuente. (Simak Ltda, 2019)

Una aplicación que también abarca este tipo de material es el de un engranaje (ver figura 21). Debido a que estos mecanismos están expuestos a cargas inesperadas repentinas que pueden romper o doblar uno o más dientes. En este caso, la rotura probablemente será más segura ya que la estructura podrá continuar operando, aunque mal, hasta que se efectúe el reemplazo.



Figura 21. Engranaje de fundición nodular. Fuente. (Luoyang Evon Engineering, 2016)

2.4 Marco Legal

Normas para ensayos:

ASTM International: Desde su fundación en 1898, ASTM International (American Society for Testing and Materials) es una de las organizaciones internacionales de desarrollo de normas más grandes del mundo. En ASTM se reúnen productores, usuarios y consumidores, entre otros, de todo el mundo, para crear normas de consenso voluntarias. Las normas de ASTM se crean usando un procedimiento que adopta los principios del Convenio de barreras técnicas al comercio de la Organización Mundial del Comercio (World Trade Organization Technical Barriers to Trade Agreement). Las normas de ASTM International se usan en investigaciones y proyectos de desarrollo, sistemas de calidad, comprobación y aceptación de productos y transacciones comerciales por todo el mundo. Estas normas son utilizadas y aceptadas mundialmente y abarcan áreas tales como metales, pinturas, plásticos, textiles, petróleo, construcción, energía, el medio ambiente, productos para consumidores, dispositivos y servicios médicos y productos electrónicos (Coello, 2018)

ASTM A370-77: Métodos de ensayo normalizados y definiciones para ensayos mecánicos de productos de acero. Estos métodos de ensayo cubren los procedimientos y

definiciones para la prueba mecánica de forjado y fundido, aceros inoxidables y aleaciones relacionadas. Los diversos ensayos mecánicos descritos en este documento se utilizan para determinar las propiedades requeridas en las especificaciones del material. Las variaciones en los métodos de prueba deben ser evitadas, y los métodos estándar de la prueba se deben seguir para obtener resultados aproximados y comparables (ASTM interntational, 2014).

ASTM A247-67: Método de prueba estándar para la evaluación de la microestructura del grafito en la fundición de hierro: Este método de ensayo trata sobre la clasificación de grafito de fundiciones en términos de tipo, la distribución y el tamaño. Este método de prueba pretende ser aplicable para todas las aleaciones hierro-carbono que contiene partículas de grafito, y se puede aplicar a fundición gris, hierros maleables, y fundición nodular (ASTM interntational, 2014).

ASTM E18-08b: Métodos de ensayo normalizados para dureza Rockwell de los materiales metálicos: Estos métodos de ensayo cubren la determinación de la dureza Rockwell y la dureza superficial de Rockwell de materiales metálicos por la hendidura principio de dureza Rockwell. Esta norma establece los requisitos para las máquinas de dureza Rockwell y los procedimientos para realizar pruebas de dureza Rockwell (ASTM interntational, 2014).

ASTM E3-95: Práctica estándar para preparación de muestras metalográficas. El objetivo principal de los exámenes metalográficos es revelar los constituyentes y la estructura de los metales y sus aleaciones por medio del microscopio de luz. En casos especiales, el objetivo del examen puede requerir el desarrollo de menos detalles que en otros casos, pero en casi todas las condiciones, la selección y preparación adecuadas de la muestra es de gran importancia (ASTM interntational, 2014).

ASTM E1508: Guía estándar para el análisis cuantitativo por espectroscopia de energía dispersiva. Esta norma nos presenta una guía para el análisis cuantitativo obtenido por medio del análisis EDS. Donde se dan ciertas referencias que se encuentran bajo el control del investigador además de indicar como se identifican (ASTM Anual Book of Standards, 2003).

ASTM E2142: Métodos de prueba estándar para calificar y clasificar las inclusiones en acero usando el microscopio electrónico de barrido. Esta norma hace referencia a los procesos para el análisis de la inclusión de diferentes materiales en un acero. Donde el SEM (microscopio electrónico de barrido) es utilizado en su mayor resolución para posteriormente mediante el EDS (espectroscopia de energía dispersiva) conocer su composición química (ASTM Anual Book of Standards, 2003).

Capítulo 3. Diseño Metodológico

3.1 Tipo de Investigación

Se implementará una investigación científica teniendo en cuenta que es aquella que consiste en un proceso metódico y sistemático dirigido a la solución de un problema por medio de la obtención de nuevos conocimientos.

Según nivel de profundidad

Investigación descriptiva: Utilizado este tipo de investigación debido a que se pretende resaltar y diferenciar las nuevas propiedades obtenidas por el material

Según el diseño

Investigación documental: Es implementada porque se están usando datos secundarios obtenidos por otros autores para aportar nuevos conocimientos sobre el mejoramiento de las propiedades de los materiales.

Según su propósito

Investigación aplicada: Debido a que, con los nuevos valores registrados luego de la aplicación de los distintos tratamientos térmicos, se puede asesorar acerca de cuál será el tratamiento que me otorgará las mejores propiedades para la aplicación deseada.

3.1.1. Etapas del proyecto.

Estas son fases para el desarrollo del proyecto cumpliendo con los objetivos específicos. De esta forma se formulan cada una de las fases y sus actividades al fin de dar una solución al problema entre las cuales tenemos:

3.1.1.1 FASE I: Estudiar las propiedades mecánicas y físicas de la fundición gris nodular por medio de las diferentes bases de datos, con la finalidad de establecer sus características más importantes

1. Buscar en las bases de datos como ScienceDirect y Scopus información relacionada con la fundición nodular y tratamientos térmicos.

2. Seleccionar la información más pertinente y necesaria para conocer las propiedades mecánicas de la fundición nodular y sus características.

3. Analizar los distintos tipos de tratamientos térmicos aplicados a las fundiciones nodulares.

3.1.1.2 FASE II.: Realizar el tratamiento térmico de templado, revenido y recocido mediante pruebas de laboratorio para optimizar las propiedades mecánicas de la fundición nodular.

1. Buscar los materiales y equipos necesarios para la realización de los tratamientos térmicos.

2. Preparar las probetas de la fundición nodular para las respectivas pruebas.

3. Planificar los ensayos para obtener los resultados de las pruebas de laboratorio.

3.1.1.3 FASE III.: Analizar los resultados obtenidos mediante comparación bibliográfica y por ensayos de laboratorio para comparar las nuevas propiedades obtenidas por el material.

1. Tabular los resultados obtenidos mediante ensayos de laboratorio

2. Comparar los resultados bibliográficos y los obtenidos en los ensayos de laboratorio

3. Realizar análisis de la metalografía por medio de análisis SEM y EDS.

3.2 Presupuesto

Tabla 13

Presupuesto

Rubro	Cantidad	Fuente de financiación		Total
		Efectivo	Especie	
EQUIPOS - HERRAMIENTAS	Disco de freno	1	\$50.000	\$50.000
REACTIVOS Y MATERIAL DE LABORATORIO	Disco de corte	2	\$7.000	\$14.000
	Horno	1		Laboratorio UFPSO
	Durómetro	1		Laboratorio UFPSO
	Maquina pulidora	1		Laboratorio UFPSO
	Microscopio	1		Laboratorio UFPSO
	Maquina prensadora	1		Laboratorio UFPSO
MATERIALES E INSUMOS	Resinas fenólicas	9		Laboratorio UFPSO
	Picral	1		Laboratorio UFPSO
	DRX, SEM Y EDS	3	900.000	UIS, UFPS
ENSAYOS DE LABORATORIO EXTERNOS				
TOTAL				\$964.00 0

Fuente: Autor 2019.

Capítulo 4. Resultados

4.1 Estudiar las propiedades mecánicas y físicas de la fundición nodular por medio de las diferentes bases de datos, con la finalidad de establecer sus características más importantes.

Es necesario conocer previamente las propiedades mecánicas de la fundición nodular, según las referencias, diversas normas y fuentes. Para posteriormente realizar la comparación mediante los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio. Además de resaltar las propiedades adquiridas luego de la aplicación de los distintos tratamientos térmicos, sus tiempos y temperatura respectivas. En las siguientes tres actividades se observa información que está contenida dentro del marco referencial, por lo tanto, solo se mostrara la información y datos más relevantes para cada aplicación de algún tratamiento térmico.

4.1.1 Buscar en las bases de datos como ScienceDirect y Scopus información relacionada con la fundición nodular y tratamientos térmicos. En las distintas bases de datos y fuentes bibliográficas se consulto acerca de la fundición nodular, investigando sus usos, estudios, artículos de revista, entre otras. Además de los diversos tratamientos térmicos que se aplican a las mismas. En la siguiente Tabla 13 se presentan las fuentes consultadas y la información necesaria para el desarrollo del proyecto.

Tabla 14

Marco de referencia de algunas fuentes consultadas

Año	Autor	Título	Objetivo
2011	Blaz Šamec, Iztok Potra	Fatiga de ciclo bajo de fundición nodular utilizada para discos de freno de ferrocarril	Realizo pruebas de tracción y flexión a hierro fundido nodular EN-GJS500-7. Microestructura del material a diferentes temperaturas
2012	P. Canzar, Z Tonkovic	Influencia de la microestructura en el comportamiento de fatiga del hierro nodular fundido	Estimo la vida útil de acuerdo a la fatiga en cuatro tipos de fundiciones nodulares
2014	Downes Rizzo, Norberto	Fundición nodular de alto rendimiento	Hablo sobre la historia de la fundición nodular
2017	Shanker, P Shiva	Una revisión de las propiedades de los materiales y de matriz metálica en la fabricación de frenos de disco	Estimo las propiedades que debe tener el material que conformara en el disco en el sistema de freno
2018	Daanvir Karan Dhir	Rendimiento termo mecánico de los frenos de disco de automoción.	Realizo el diseño optimo del freno de disco, para evitar recalentamiento

Fuente: Autor 2019.

4.1.2 Seleccionar la información más pertinente y necesaria para conocer las propiedades mecánicas de la fundición nodular y sus características. Esta actividad se hace necesaria, debido que para la comparación de las propiedades adquiridas por el material luego de la aplicación de los tratamientos térmicos, fue necesario tener una referencia para esos valores. Por lo tanto, se citaron artículos y normas que poseen el valor de ciertas propiedades como la dureza, resistencia a la tracción, resistencia a la compresión, así como su estructura metalográfica como se muestra en la figura. Los valores de las diversas propiedades se pueden apreciar en la Tabla 11, en tanto a la clasificación de la fundición nodular según la norma ASTM A-536 se muestra en la Tabla 12.

4.1.3 Analizar los distintos tipos de tratamientos térmicos aplicados a las fundiciones nodulares. Los tratamientos térmicos que se aplicaran consisten en el templeado,

revenido y recocido. Con la aplicación de estos 3 tratamientos se busca aumentar la dureza, resistencia a la tracción y compresión, además de eliminar los esfuerzos internos producidos durante el calentamiento de la pieza en su instancia en el horno.

Tabla 15

Tratamientos térmicos aplicados a las muestras

Tratamiento térmico	Descripción
Templado	Con el templado se obtiene una matriz de estructura martensítica (mayor dureza) óptima para la mejora deseada en la fundición nodular a utilizar, calentando el material por encima de 900 °C. 1h por cada 25mm de espesor.
Revenido	Empleado luego de aplicar un templado, porque después del proceso de temple las piezas de aceros quedan muy duras y frágiles, lo cual en muchas ocasiones dificulta el maquinado.
Recocido	En muchos casos es el último en aplicar, ya que al usarlo en fundiciones nodulares se puede reducir aún más su dureza y por consiguiente mejorar su maquinabilidad, aliviar tensiones, incremento en la ductilidad y resistencia al impacto.

Fuente: Elaboración propia

4.2 Realizar el tratamiento térmico de templado, revenido y recocido mediante pruebas de laboratorio para optimizar las propiedades mecánicas de la fundición nodular. En esta etapa del proyecto se realizaron las pruebas de laboratorio. Las cuales consisten en la aplicación de los tratamientos térmicos, comparación de durezas, caracterización física y química por Microscopia Electrónica de Barrido (SEM, por sus siglas en ingles), Espectrometría de Dispersión de Energía de Rayos X (EDS, por sus siglas en ingles) y Difracción de Rayos X (XRD), por sus siglas en ingles.

4.2.1 Buscar los materiales y equipos necesarios para la realización de los tratamientos térmicos. Para proceder con el primer pasó que es la aplicación de los tratamientos térmicos se necesitó seleccionar el material base, fue de fundición gris nodular

que es el material con el que están fabricados generalmente los frenos de disco. En este caso fue un disco de freno como el que se muestra en la siguiente figura 22.



Figura 22. Disco de freno (material base). Fuente. Autor 2019.

Además, se utilizó uno tipo mufla tubular marca Terrigeno (ver figura 23) para el calentamiento de las probetas, este tiene resistencias de forma espiral localizados en las ranuras del interior del horno para otorgar una radiación optima. El cual nos permite alcanzar temperaturas de hasta 1200 °C, suficiente para la realización de este proyecto, debido a que para el proceso de recocido se utilizó una temperatura de 915 °C.



Figura 23. Horno Terrigeno utilizado para realizar los tratamientos térmicos. Fuente. Autor 2019.

Posteriormente, luego de haber realizado los tratamientos térmicos se procedió a ejecutar las pruebas de durezas para el conjunto experimental, empleando un durómetro de referencia Multitoyo HR-300 como el que se muestra en la figura 24.



Figura 24. Durómetro. Fuente. Autor 2019.

Para las pruebas de difracción de rayos X (XRD), se utilizó el equipo comercial Bruker D8 ADVANCE como se muestra en la siguiente figura 25:



Figura 25. Bruker D8 Advance. Fuente. (Bruker, 2018)

Asimismo, para las pruebas Microscopia Electrónica De Barrido se utilizó el equipo comercial COXEM INTEK como se muestra en la siguiente figura 26:



Figura 26. COXEM INTEK. Fuente. (Bruker, 2018).

4.2.2 Preparar las probetas de la fundición nodular para las respectivas pruebas.

Teniendo en cuenta la siguiente figura 27, se muestra la geometría del disco para obtener las distintas probetas necesarias para el conjunto experimental. Por lo tanto, según las normas



Figura 29. Probetas obtenidas del disco de freno. Fuente. Autor 2019.

4.2.3 Planificar los ensayos para obtener los resultados de las pruebas de laboratorio. Para la selección de los tiempos que se emplearon en los tratamientos térmicos, se usaron referencias y recomendaciones de investigaciones previas, acerca de la aplicación del material en las diferentes fundiciones.

Para el templeado según como lo cita (Castillo, 2012), el material debe ser calentado en conjunto con el horno, además de mencionar que el tiempo recomendado es de una 1 h por cada 25 mm de espesor. Con una temperatura de 900 °C para obtener la estructura martensítica deseada, debido a que esta tiene mayor dureza, pero en este caso se utilizó un tiempo de calentamiento de dos horas (ver figura 30).

Para el medio de enfriamiento para el temple, se utilizó aceite de motor (quemado) en el cual se logró observar la formación de una abundante capa de humo (ver figura 31) cuando se sumergieron las piezas en el depósito con aceite denominada etapa de enfriamiento por medio de una capa de vapor, según las etapas de extracción de calor durante el templeado.

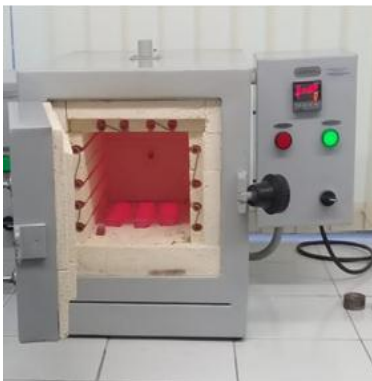


Figura 30. Piezas en el horno a 900 °C. Fuente. Autor 2019.



Figura 31. Capa de vapor producida en la etapa de enfriamiento. Fuente. Autor 2019.

En tanto al revenido, la temperatura depende de las propiedades deseadas como lo muestra la Tabla 7; por lo tanto, se escogió una temperatura de 190 °C para obtener una baja disminución de dureza y un aumento en la resistencia al desgaste, así como la disminución de las tensiones internas. El tiempo seleccionado es de 1 h, basados en los ensayos realizados por (Yu Lajtin, 1973) aplicados sobre un acero con contenido de 0,62% C, y se enfrió mediante el uso aceite quemado al igual que el temple.

Por último, para el recocido se aplicó una temperatura de 915 °C por 2h, debido a que esta pieza fue previamente revenida y para obtener una fundición nodular grado 100-70-06 como se observa en la Tabla 8. Al obtener ese tipo de clase la fundición nodular, según la

norma ASTM A-536 este tipo de grado me ofrece buenas propiedades en cuanto a la resistencia al desgaste y la tenacidad. Además de eliminar las tensiones internas generadas en la pieza, por lo tanto, mejorando su maquinabilidad. Para su enfriamiento se efectuó por medio del medio ambiente, pero con el uso de un ventilador para forzar el paso del aire.

Con la finalidad de obtener una validez estadística de las pruebas realizadas se emplearon 9 probetas, y se utilizaran los tiempos, temperatura que se muestran en la Tabla 15. Además, se cuenta con una muestra del material base que servirá de referencia para comparar los resultados obtenidos luego de la aplicación de los tratamientos térmicos. En la Tabla 16, se muestra a que tratamientos térmicos fueron realizados a cada probeta, además de su modo de enfriamiento, para luego comparar los resultados obtenidos y recomendar el mejor medio para la extracción de calor de los tratamientos térmicos.

Tabla 16

Ensayos tratamientos térmicos.

Tratamiento térmico	Tiempo (horas)	Temperatura (Celsius)
Templado	2	900
Revenido	1	190
Recocido	2	915

Fuente: Autor 2019.

Tabla 17

Tratamientos térmicos aplicados

Numero de muestra	Tratamiento térmico			Enfriamiento
	Templado	Revenido	Recocido	
Material base	-	-	-	-
1	X	-	-	Aceite
2A	X	X	X	Aceite
2B	X	X	X	Agua
2C	X	X	X	Aire

3A	-	X	X	Aceite
3B	-	X	X	Agua
3C	-	X	X	Aire
4A	X	-	X	Aceite

Fuente: Autor 2019.

4.3 Realizar el tratamiento térmico de templado, revenido y recocido mediante pruebas de laboratorio para optimizar las propiedades mecánicas de la fundición nodular.

Después de realizar los ensayos de laboratorio, en cuanto a los tratamientos térmicos, análisis metalográfico y pruebas de dureza se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación basados en las actividades establecidas:

4.3.1 Tabular los resultados obtenidos mediante ensayos de laboratorio. Los estudios realizados en el laboratorio consistieron en la obtención de la metalografía y de los valores de dureza. Por lo tanto, para realizar estos procesos fue necesario realizar ciertas acciones con el material obtenido luego de los tratamientos térmicos. Se comenzó con cortar las pequeñas piezas que se introdujeron en el horno (ver figura 32) y se cortaron por la mitad con una cortadora de precisión de referencia Pico 155 (ver figura 33), posteriormente realizar

la preparación metalográfica que consiste en lijado y pulido para obtener una mitad para los estudios de dureza y la restante para las muestras metalográficas.



Figura 32. Muestras de fundición nodular templada. Fuente. Autor 2019.



Figura 33. Pico 155 Precision Cutter. Fuente. Autor 2019.

El encapsulamiento del material, fue realizado con resina fenólica realizado en la maquina prensadora de montaje TP-7001 (ver figura 34), usando moldes de las resinas de color verde. En este proceso se inserta la muestra de la fundición en conjunto con el molde de resina por la parte superior de la máquina, para luego ser sellado herméticamente el cual pasa por una etapa de calentamiento, temperatura constante a 200 °C y por último enfriamiento hasta la temperatura ambiente.



Figura 34. Maquina para encapsular muestras TP-7001. Fuente. Autor 2019.

Para el mejor uso de la muestra obtenida, que es de un tamaño relativamente pequeño, se insertó en una resina fenólica, dejando el corte de la sección transversal en la parte superior de la probeta (ver figura 35). Antes de pasar a las pruebas metalográficas y de dureza fue necesario pulir las piezas. En el caso de las pruebas de metalografía se fue variando el tipo de rugosidad de la lija de desbaste, desde una 240 hasta una 1200, mientras que para obtener los valores de dureza se pule con una 240 y luego una 320. El proceso de pulido se realizó empleando la maquina Nano 2000T grinder-pulisher, con un giro del disco de 200rpm, durante 1 minuto (ver figura 36).

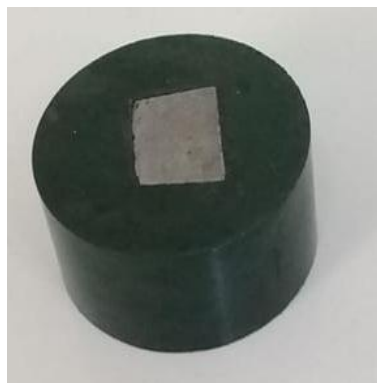


Figura 35. Probeta introducida en resina fenólica. Fuente. Autor 2019.



Figura 36. Maquina para pulir probetas Nano 2000T. Fuente. Autor 2019.

Prueba de metalografía: Para estos ensayos de laboratorio se siguió la norma ASTM E3, teniendo como pasos: proceso de desbaste, proceso de pulido, ataque químico y por último el análisis de las imágenes. Luego de que la probeta ya se encuentre encapsulada en la resina fenólica y desbastada hasta usar la lija 1200, se utiliza por último el agente abrasivo para el pulido final, en este caso se utilizó alúmina de 0,5 micras como se muestra en la figura 37 para el pulido, donde posteriormente fue lavado con agua y después con alcohol. Es necesario aplicar un ataque químico a las muestras que se someterán a estudios metalográficos, debido a que con la aplicación de dicho ataque se puede observar mejor su microestructura a través del microscopio. En este caso como agente químico se utilizó picral



Figura 37. Pulido final con alúmina. Fuente. Autor 2019.

En la siguiente figura 38, se muestra la identificación de cada probeta para el conjunto experimental y su metalografía respectiva con un aumento de 100X, la cual será comparada y analizada en la siguiente actividad. En la mayoría de microestructuras se muestra la presencia de nódulos de grafito, donde su tamaño y distribución varía de acuerdo a su método de enfriamiento.

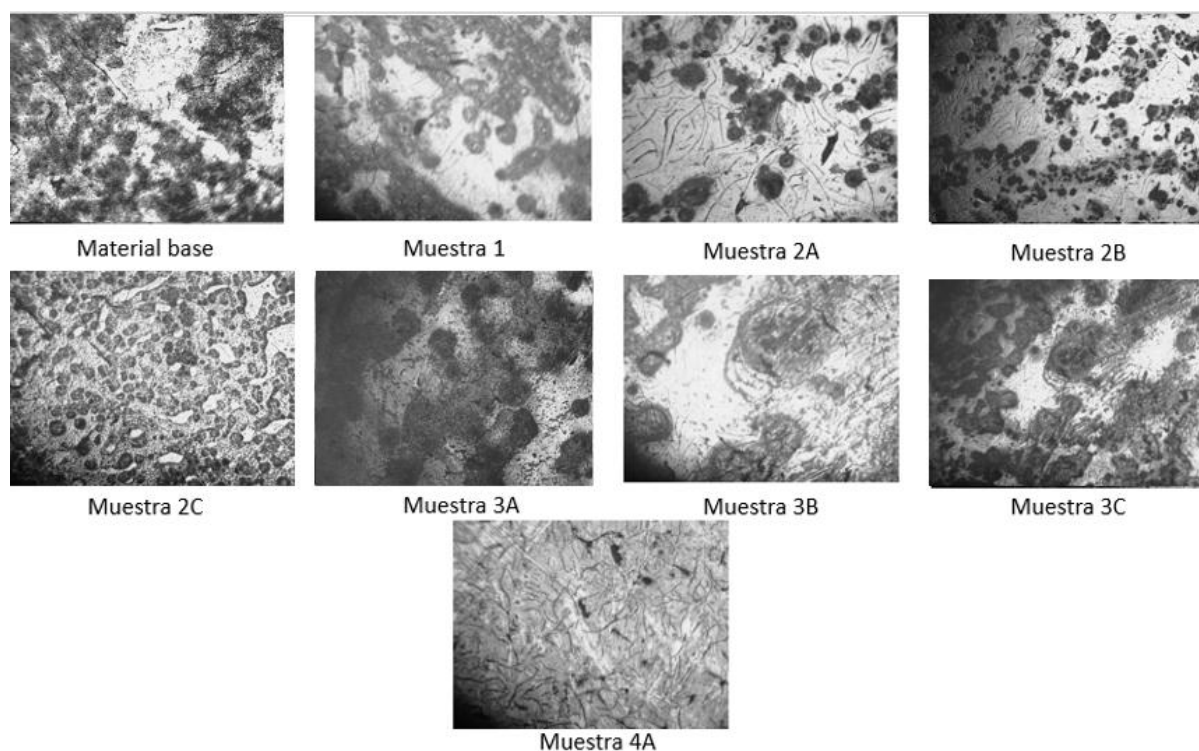


Figura 38. Metalografía de las diversas muestras de fundición nodular. Fuente. Autor 2019.

Prueba de dureza: Para la prueba de dureza, fue necesario como se mencionó anteriormente, pulir la pieza obtenida del tratamiento térmico que posteriormente se colocara en la máquina para medir la dureza, en este caso una Multitoyo HR-300 como la que se muestra en la figura 24. Las piezas deben ser pulidas y emparejadas debido a que es necesario que al colocar la pieza en la base de la maquina donde se aplicara sobre él una fuerza

mediante una punta ya sea de bola o de diamante, el plano superior como inferior deben ser totalmente paralelos, asimismo se asegura una buena toma de datos.

Para obtener unos valores adecuados, se realizaron 3 indentaciones sobre cada pieza para luego obtener un promedio de las mismas. Las mediciones se realizaron en algunas piezas en Rockwell B debido a su baja dureza, y otras en Rockwell C por su mayor dureza. En la Tabla 17 se muestran los valores obtenidos, además de la conversión de la dureza a Brinell, para poder compararlos posteriormente.

Tabla 18. *Durezas obtenidas en los ensayos de laboratorio*

Numero de muestra	Rockwell B	Dureza Rockwell C	Brinell
Material base	89,37	-	180 ± 0,9
1	-	38,70	353 ± 1,92
2 A	-	57,10	595 ± 3,36
2 B	85,53	-	169 ± 0,23
2 C	-	37,17	344 ± 1,10
3 A	-	64,07	722 ± 1,59
3 B	84,93	-	165 ± 1,36
3 C	-	34,37	319 ± 0,21
4 A	-	61,27	670 ± 2,32

Nota: Valores obtenidos en Rockwell B o Rockwell C. Fuente. Autor 2019.

4.3.2 Comparar los resultados bibliográficos y los obtenidos en los ensayos de laboratorio. Comparación de microestructura: Para ver la variación de la microestructura, se comparan los resultados obtenidos en la figura 38, donde se puede apreciar en las muestras 2 y 3 que, a velocidades altas de enfriamiento en el recocido, la cantidad de los nódulos de grafito disminuyo, pero a su vez aumenta su tamaño. En la muestra que fue templada y posteriormente recocida se puede apreciar una microestructura con presencia de plaquetas de martensita y austenita retenida. Esta pueda ser comparada con la microestructura obtenida por (Restrepo Velez, 2001) en su trabajo de investigación, ilustrada en la figura 40 donde se

observa que aplicando un tratamiento de recocido se puede obtener una microestructura ferrítica. Además, se aprecia que las piezas enfriadas en aceite presentan una gran dureza debido a su tamaño mayor de los nódulos de grafito contenidos en una estructura de ferrita. Esto se puede apreciar en la muestra base y en los tratamientos térmico que usaron como medio de enfriamiento el aceite (ver figura 39), como lo son: la muestra que fue templada solamente a 900 °C (1), la que fue sometida a los tres tratamientos térmicos (2A) y la sometida revenido y recocido (3A).

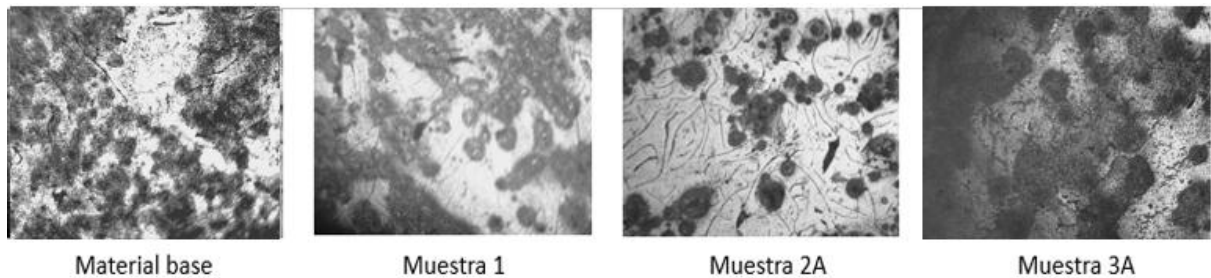


Figura 39. Muestras metalográficas con mayor presencia de nódulos de grafito. Fuente. Autor 2019.

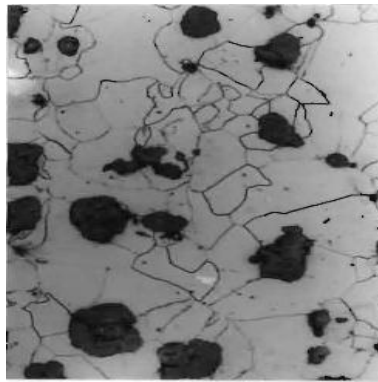


Figura 40. Microestructura ferrítica, luego de aplicado el recocido. Fuente. (Restrepo Velez, 2001)

En la imagen que nos arroja el material base (ver figura 41), se puede observar la presencia de grafito esferoidal, donde en algunos casos los nódulos son de forma circular y en otros un poco distorsionadas. El ataque químico es usado para revelar mejor la

microestructura, donde las zonas de perlita son las más oscuras después de los nódulos de grafito y la ferrita aparece alrededor de las zonas de los nódulos.

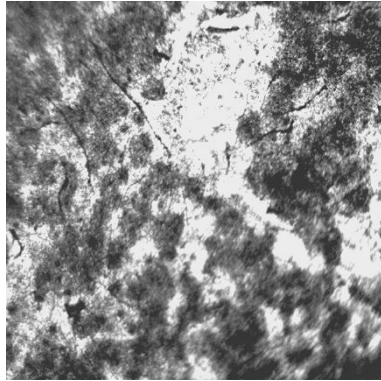


Figura 41. Metalografía del material base (100X). Fuente. Autor 2019.

Esta diferencia de fases y constituyentes en la microestructura se puede apreciar mejor cuando se cuenta con un microscopio de barrido (SEM), en la figura 42 se observa la microestructura de una fundición nodular la cual uso como ataque químico nital, en donde la presencia de ferrita y perlita son aproximadamente del 50%.

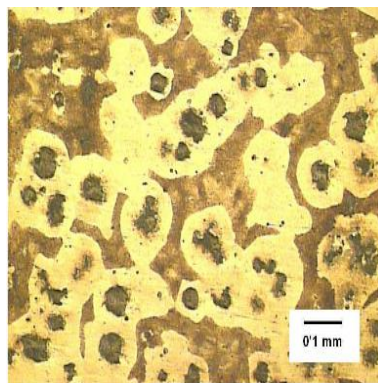


Figura 42. Microestructura de fundición nodular (SEM). Fuente. (García, 2013).

Se observa que al aplicar como ultimo tratamiento térmico el revenido se logra un aumento sustancial en la cantidad de nódulos de grafito, asimismo aumentando su dureza por la presencia de dichos nódulos en su microestructura. En la muestra 3A se logró una dureza elevada debido al conjunto de gran tamaño de nódulos y gran presencia de los mismos, pero

con una dispersión de dichos nódulos lo cual afecta su maquinabilidad. En la microestructura 2C (ver figura 43) se aprecia gran presencia de nódulos alrededor de toda la microestructura, pero más agrupados, por lo tanto, el aumento de dureza no afecta de gran manera su maquinabilidad.

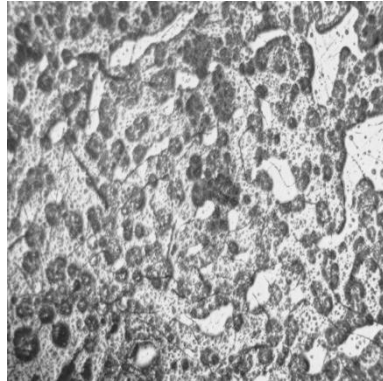


Figura 43. Muestra sometida a recocido con gran presencia de nódulos de grafito. Fuente. Autor 2019.

En cuanto a la cantidad de los nódulos de grafito se empleó el software ImageJ, para contar la cantidad de grafito esferoidal presente en la microestructura, las cuales tienen un aumento de 100X. En este programa se modificó la imagen para tener una mejor vista de los nódulos, así como se muestra en la figura 44.



Figura 44. Microestructura de la fundición nodular modificada en ImageJ. Fuente. Autor 2019.

Los valores obtenidos mediante el análisis de estas imágenes son presentados en la Tabla 18, donde se puede apreciar que a mayor velocidad de enfriamiento hay menor presencia de nódulos de grafito en las muestras que fueron sometidas a recocido. Todas las imágenes obtenidas mediante el software ImageJ, con su respectiva tabla de valores se encuentran en los Anexos 1

Tabla 19

Cantidad de nódulos de grafitos en las diversas microestructuras.

Muestra	Cantidad de nódulos	Medio de enfriamiento
Material base	207	-
Muestra 1	300	Aceite
Muestra 2A	247	Aceite
Muestra 2B	308	Agua
Muestra 2C	321	Aire
Muestra 3A	227	Aceite
Muestra 3B	230	Agua
Muestra 3C	319	Aire

Fuente: Autor 2019.

Comparación de la dureza: Para comparar los valores de la dureza se utilizan los datos que se encuentran en la Tabla 17. Donde se observa cómo se mencionó en el párrafo anterior, que las muestras enfriadas en aceite después del calentamiento en el horno, presentan la mayor dureza. Dicha variación de valores se puede observar en la figura 49 donde muestra un histograma en forma de barras, el cual muestra en el eje horizontal las diferentes muestras, y en el vertical los valores de dureza en la escala Brinell.

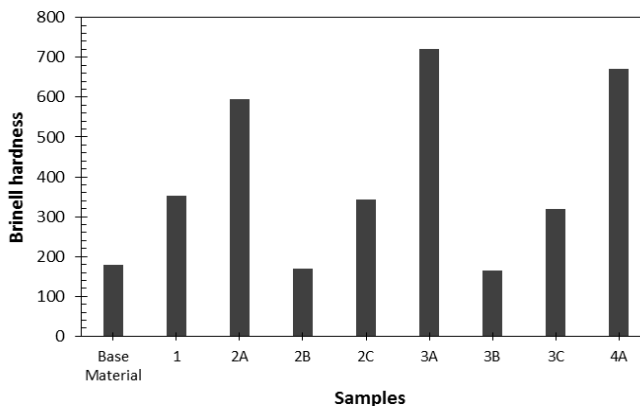


Figura 45. Representación gráfica de los valores de dureza. Fuente. Autor 2019.

En la mayoría de las probetas la dureza aumento con respecto a la muestra base, se nota que con la aplicación únicamente del templeado se logró un aumento casi del doble de su dureza. Este notable aumento de dureza, puede afectar el material de cierta manera, debido a que trae consigo un aumento en la fragilidad del material, esto influenciado por las tensiones internas generadas dentro del material luego del temple; por lo tanto, se hace necesario aplicar otros tratamientos térmicos para el alivio de dichas tensiones.

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede deducir que las mejores muestras en tanto a la dureza, son la 2C y 3C, debido a que su aumento de dureza fue sustancial respecto a la muestra base. Además, luego de aplicado el revenido y recocido se consigue una mejora en la maquinabilidad respecto a la muestra 1. Es decir, para obtener una pieza con unas propiedades aceptables es necesario que el medio de enfriamiento en él recocido sea por medio del aire, por lo tanto, un enfriamiento lento.

La muestra 4A presenta una dureza elevada debido a que su enfriamiento fue rápido, empleando el aceite como medio para llegar a la temperatura ambiente. Fenómeno apreciado también es las muestras 2A y 3A donde se encuentran las mayores durezas.

Estas variaciones de dureza son debidas a las diferentes microestructuras obtenidas, donde se puede observar que en donde existen nódulos de gran tamaño como por ejemplo en la muestra 3A se presenta la mayor dureza, y en tanto disminuye su tamaño también la dureza. Asimismo, en la muestra 2B se encuentra la menor dureza, debido a su menor tamaño en los nódulos de grafito, así como la dispersión de los mismos. Por lo tanto, se puede concluir que, para obtener una dureza mayor, pero que no afecte la maquinabilidad es necesario obtener una microestructura con una presencia de nódulos de grafito de tamaño promedio, pero con una gran cantidad de estos como se aprecia en la metalografía de las muestras 2Cy 3C.

4.3.3 Realizar análisis de la metalografía por medio de análisis SEM y EDS. Luego de realizar los tratamientos térmicos, se seleccionó la probeta 3A a la cual se le realizó el análisis de SEM-EDS y DRX, la cual contenía la mayor dureza del conjunto experimental.

Además, se realizaron técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectrometría de rayos X de dispersión de energía (EDS) a 20 kV en el equipo COXEM INTEK para evaluar la microestructura y la composición química sobre la superficie como se muestra en la figura 46 a y 46 b.

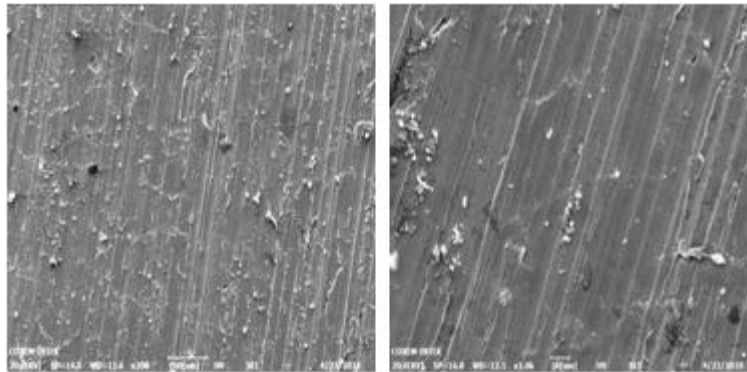


Figura 46. a) Micrografía de la muestra 3A con 200x, b) Micrografía de la muestra 3A con 1000X. Fuente. Autor 2019.

Teniendo en cuenta la figura 46b, se realizó un EDS puntual con la finalidad de identificar los principales elementos de aleación, de lo que se obtuvo la siguiente figura 47 además de observar los porcentajes existentes de los diversos elementos en la muestra analizada:

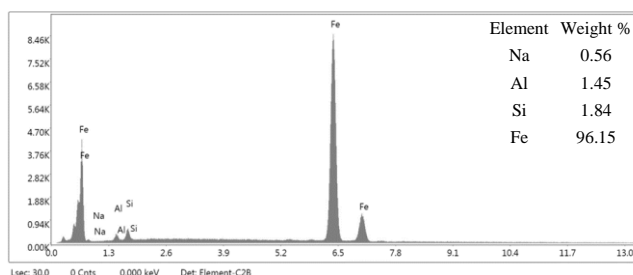


Figura 47. EDS de la muestra 3A. Fuente. Autor 2019.

Teniendo en cuenta los resultados de SEM-EDS, se evidencia la presencia de los elementos de aleación, siendo el hierro en mayor proporción según lo corroborado teniendo en cuenta la bibliografía; por otra parte, la presencia de los nódulos de grafito se deben al alto contenido de hierro y por lo tanto la influencia de los elementos de aleación como el silicio y la alúmina principalmente. Los elementos de aleación hacen que el disco de freno sea

resistente en términos de los cambios de temperatura y al desgaste mecánico por la fricción generada entre el disco y la pastilla.

Posteriormente, con la finalidad de identificar las fases presentes en el material, se realizó el análisis en el difractómetro de marca comercial BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría DaVinci bajo las siguientes condiciones: Voltaje: 40 kV, Corriente: 40 mA, con Angulo: 2° a 2θ , Radiación: $\text{CuK}\alpha$, con un tiempo de muestreo de 0,8 segundos, de lo que se obtuvo la siguiente figura 48:

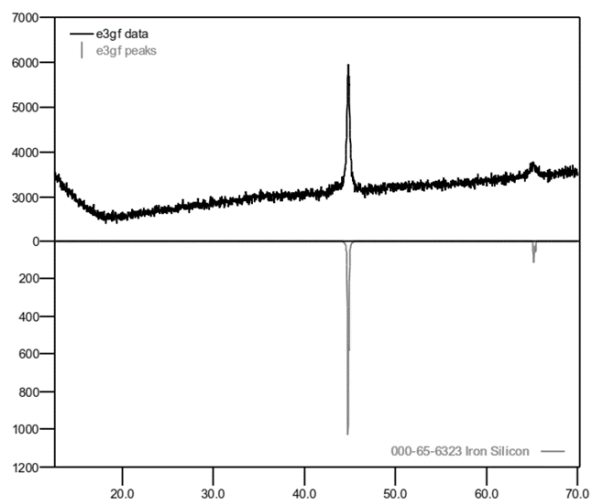


Figura 48. RXD de la muestra 3A. Fuente. Autor 2019.

De la figura anterior, se observa que a un ángulo de 44 grados se presenta el pico representativo de este tipo de fundición gris nodular. Por otra parte, las fases cristalinas fueron identificadas con ayuda de la base de datos PDF-2 del *International Centre for Diffraction Data* (ICDD), obteniendo la siguiente Tabla 19:

Tabla 20

Fases cristalinas de la muestra 3A.

FASE	Caracterización cristalográfica	NOMBRE (PDF)
$\text{Fe}_{0,905} \text{Si}_{0,095}$	Sistema cristalino Cubico $A = B = C = 2,86$ $\alpha = \beta = \varphi = 90$	Aleación de hierro (000-65-6323)

Fuente: Autor 2019.

La anterior figura comprueba la presencia de FeSi debido a los elementos de aleación en mayor proporción analizados por EDS que además fueron corroborados por la técnica de difracción; esta fase es el inicio de las formaciones de los nódulos de grafito a través de los tratamientos térmicos realizados, en los cuales se pueden observar los límites de grano (nódulos) y la cantidad de acuerdo a los resultados obtenidos en la Tabla 18.

Conclusiones

La fundición nodular al ser sometida como primer pasó a un tratamiento térmico de templado alcanza valores de dureza elevados y óptimos para la fabricación de los discos que componen el mecanismo de freno de disco. Teniendo en cuenta lo anterior, se propone como trabajo futuro evaluar este tipo de material añadiendo una matriz de nanotubos de carbono con la finalidad de aumentar la dureza y por lo tanto la resistencia al desgaste.

De acuerdo a las imágenes obtenidas en el software ImageJ, se concluyó que a velocidades lentas de enfriamiento existe gran presencia de nódulos de menor tamaño alrededor de toda la microestructura pero más agrupados, por lo tanto, el aumento de dureza no afecta de gran manera su maquinabilidad, debido a que esta propiedad se ve mejorada debido a la proximidad de los nódulos de grafitos de unos con otros en los límites de grano.

Se aprecia en las imágenes obtenidas por el microscopio que para obtener nódulos de grafito en la microestructura de la fundición nodular es necesario aplicar el tratamiento térmico de revenido luego de haber pasado por el proceso de temple. Debido que de lo contrario se obtiene una estructura ferrítica con presencia de martensita (agujas) y austenita, que también otorgan gran dureza al material.

Al evaluar las microestructuras obtenidas en los análisis de SEM-EDS y XRD, se evidencia que con la aplicación de técnicas térmicas se logra un aumento de hierro en su composición química, asimismo aumenta la presencia de nódulos de grafito lo cual otorga gran aumento en la dureza final del material, teniendo en cuenta los elementos de aleación y la presencia en mayor cantidad del hierro.

Referencias

- Acosta Esqueda, M. A., & Martinez Madrid, M. (2000). *El tratamiento de los hierros nodulares en el mejoramiento de los materiales en la industria automotriz*. Queretaro. Recuperado de <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt148.pdf>
- Aguirre Breffe, Y., & Fernandez Columbie, T. (2018). *Microestructura del hierro fundido gris FG 24 sometido a tratamiento térmico*. Mexico D.F. Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/mg/v35n1/1993-8012-mg-35-01-140.pdf>
- Aleksander Yevtushenko, J. . (2009). Temperature and thermal stresses in a pad/disc during braking. *Applied Thermal Engineering*. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431109002890>
- Amigo Sanchez, J. (2013). Diagrama Hierro - Carbono. Recuperado de <https://slideplayer.es/slide/10267629/>
- Apraiz Barreiro, J. (1949). *Tratamientos Termicos de Los Aceros*. Madrid. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/219606882/Tratamientos-Termicos-de-Los-Aceros-Apraiz-Barreiro>
- ASTM Anual Book of Standards. (2003). ASTM Standards in the SEM. Recuperado de <https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/S1431927603440282>
- ASTM interntational. (2014). ASTM A536. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/A536.htm>
- Bacon Fray, R. (2008). *Fundicion nodular*. Recuperado de <https://www.coursehero.com/file/9075440/fundicion-nodular/>

- Bello Moreno, M. G. (1985). *Tratamientos Térmicos del Hierro Nodular*. Escuela Superior Politecnica Del Litoral.
- Belzunce Navarra, F. J. (2001). *Aceros y fundiciones: estructuras, transformaciones, tratamientos termicos y aplicacionES*. Gijon. Recuperado de <https://aceroplatea.es/docs/documento138.pdf>
- Boccardo, A. ., & Dardati, P. . (2017). Austempering heat treatment of ductile iron: Computational simulation and experimental validation. *Finite Elements in Analysis and Design*. Recuperado de <https://sibdigital.ufps.edu.co:2089/science/article/pii/S0168874X17302482>
- Bombas mejoradas SA de CV. (2016). Hierro ductil o nodular. Recuperado de <https://bmfundicion.mx/es/productos/hierro-nodular>
- Bruker. (2018). D8 Advance. Recuperado de <https://www.bruker.com/es/products/x-ray-diffraction-and-elemental-analysis/x-ray-diffraction/d8-advance/overview.html>
- Canzar, P., Tonkovic, Z., & Kodvanj, J. (2012). Microstructure influence on fatigue behaviour of nodular cast iron. *MaterialsScience&EngineeringA*.
- CAP S.A. (2000). INFOACERO - ¿Qué es el Acero? - Tipos de Acero. Recuperado el 31 de octubre de 2018, de http://www.infoacero.cl/acero/que_es.htm
- Castillo Rodriguez, F. D. (2012). *Aceros, estructuras y tratamientos térmicos*. Universidad Nacional Autónoma De México. Recuperado de http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/aceros_estructuras_y_tratamientos_termicos.pdf
- Castro Dominguez, G. (2009). *Fundiciones*. Buenos Aires. Recuperado de http://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Fundiciones.pdf

- Censa Industrial, B. (2017). Tratamiento Térmico para Ablandamiento (Recocido).
Recuperado de <https://censaindustrial.com/blog.php?id=307&tag=&q=>
- Ductil Iron Society, C. (2013). Ductile iron data for design engineers. Recuperado de
<http://www.ductile.org/didata/Section2/2intro.htm>
- Escuela de Ingenieria Julio Garavito, C. (2008). *Tratamientos térmicos protocolo*. Bogota.
Recuperado de
https://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/1537_tratamientostermicosr2.pdf
- Fundiciones Bou, s. . (2018). Fundición de metales - Fundiciones bou alicante - Fundicion artistica en bronce ALCOY - Fundicion de metal Alicante. Empresas y servicios relacionados con Fundicion de metal en Alicante. Fundicion metalica Alicante, Fundiciones metalicas. Recuperado el 30 de octubre de 2018, de
<http://www.fundicionesbou.com/productos-fundicion-de-metales.html>
- Fundinox Chile S.A. (2010). Fundicion nodular. Recuperado de
http://www.fundinox.cl/ASTM_A536.pdf
- Garzon Perez, J. (2017). Fundicion atruchada. Recuperado de
<http://www.biltra.com/fundicion-atruchada/>
- Insertec, F. & R. (2016). Horno de cámara para tratamientos térmicos. Recuperado de
<http://www.insertec.biz/es/hornos-industriales/hornos-tratamiento-termico/tratamientos-convencionales/horno-de-camara-tmcg>
- Karan Dhir, D. (2016). Thermo-mechanical performance of automotive disc brakes.
Materials Today: Proceedings, 5. Recuperado de
<https://sibdigital.ufps.edu.co:2089/science/article/pii/S2214785317325555>
- Kashima Univertsity. (2013). Frenos de disco. Recuperado de

<http://kashima.campuseina.com/mod/book/view.php?id=7614&chapterid=9456>

Kharate Chaudhari, D. (2017). Effect of Material Properties On Disc Brake Squeal And Performance Using FEM and EMA Approach. *Materials Today: Proceedings*.

Recuperado de

<https://sibdigital.ufps.edu.co:2089/science/article/pii/S2214785317330559>

Li Nan, X., & Shu-ming, Z. (2013). Microstructure and Mechanical Properties of Nodular Cast Iron Produced by Melted Metal Die Forging Process. *Journal Of Iron And Steel Research, International*. Recuperado de

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1006706X13601120>

Luoyang Evon Engineering. (2016). Fundición Nodular engranaje de circunferencia engranaje de Fundición Nodular. Recuperado de [https://es.made-in-](https://es.made-in-china.com/co_lyevon/product_Nodular-Cast-Iron-Girth-Gear-Nodular-Cast-Iron-Gear_einshriey.html)

[china.com/co_lyevon/product_Nodular-Cast-Iron-Girth-Gear-Nodular-Cast-Iron-Gear_einshriey.html](https://es.made-in-china.com/co_lyevon/product_Nodular-Cast-Iron-Girth-Gear-Nodular-Cast-Iron-Gear_einshriey.html)

Perez Patiño, J. A. (1996). *Tratamientos termicos de los aceroS*. Universidad Autonoma de Nuevo Leon. Recuperado de <http://eprints.uanl.mx/435/1/1020115008.PDF>

Pinto Gordillo, S. A. (2010). *Estudio de los tratamientos térmicos de templado y revenido en la fundición de hierro dúctil con matriz metálica ferrítica*. Escuela Politecnica Nacional. Recuperado de [http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2563/1/CD-](http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2563/1/CD-3235.pdf)

[3235.pdf](http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2563/1/CD-3235.pdf)

Proaño Guevara, M. A. (2014). Desarrollo de la tecnología para la obtencion del hierro ductil a través del horno de cubilote artesanal según los requerimientos de la norma NTE

INEN 2 499:2009. Recuperado de

<http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/8417>

- Puente Rodriguez, L. (2010). Diagrama Fe-C. Tratamientos Térmicos En Los Aceros. | automocion. Recuperado el 31 de octubre de 2018, de <http://puentelara.blogspot.com/2013/01/diagrama-fe-c-tratamientos-termicos-en.html>
- Restrepo Velez, J. M. (2001). *Austemperado de la fundicion nodular: fundamentos y tecnologia*. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/40143/1/70503554.20016.pdf>
- Rizzo Downes, N. (2014). *Fundición nodular de alto rendimiento*. Buenos Aires. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/272487696_Fundicion_nodular_de_alto_rendimiento
- Šamec, B., Potrc, I., & Sraml, M. (2011). Low cycle fatigue of nodular cast iron used for railway brake discs. *Engineering Failure Analysis*. Recuperado de <https://sibdigital.ufpso.edu.co:2089/science/article/abs/pii/S1350630711001002>
- Shiva Shanker, P. (2017). A review on properties of conventional and metal matrix composite materials in manufacturing of disc brake. *Materials Today: Proceedings 5 (2018) 5864–5869*. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785317331723>
- Simak Ltda. (2019). Valvulas metalicas. Recuperado de <http://www.simak.cl/metalicas.php>
- Tamayo Ruiz, A. G. (2016). *Fundicion del hierro nodular*. Mexico D.F.
- Universidad Autonoma de Madrid. (2004). Laboratorio virtual de fisica de materiales. Recuperado el 31 de octubre de 2018, de <http://www.uam.es/docencia/labvformat/default.html>
- Universidad Politecnica de Valencia, E. (2017). Curso de fundamentos de ciencias de los

materiales. Recuperado de https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm13/pfcm13_2_6.html

Va Larre, I. (2000). Estructuras del acero. En *Metalografía y Tratamientos Térmicos* (p. 7).

Recuperado de

https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/5-_Estructuras_del_acero_v2.pdf

Yu Lajtin, M. (1973). Principios generales de los tratamientos térmicos de los aceros. En

Metalografía y tratamientos térmicos (p. 2). Barcelona. Recuperado de

https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/4-principios_generales_de_los_tt_v2.pdf

Apéndices

Apéndice A. Muestras metalográficas modificadas en el software ImageJ.

Imagen obtenida del software ImageJ donde se observa la muestra base y una tabla con la cantidad de nódulos de grafito presenta en la microestructura.

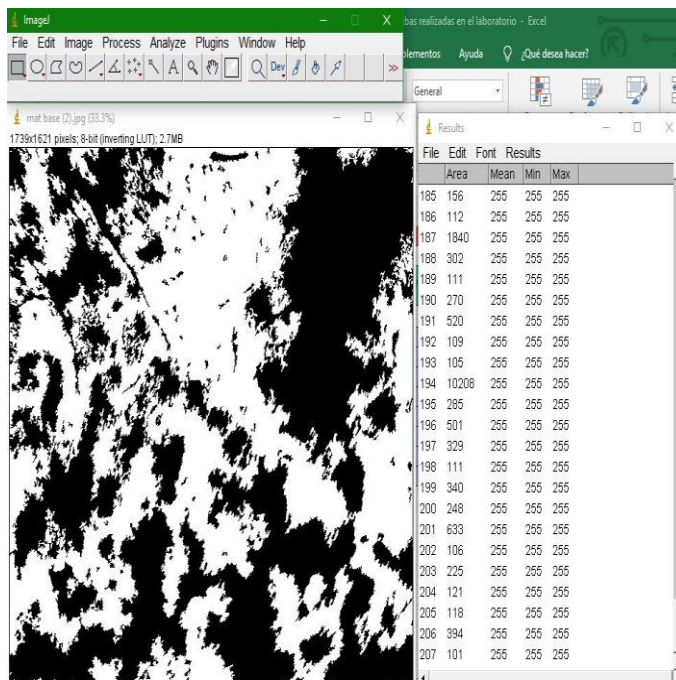


Imagen obtenida del software ImageJ donde se observa la muestra 1 y una tabla con la cantidad de nódulos de grafito presenta en la microestructura.

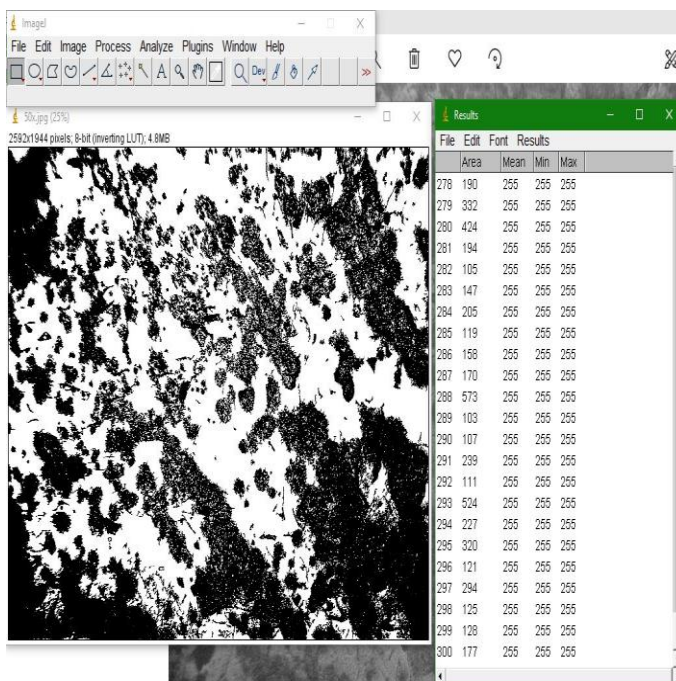


Imagen obtenida del software ImageJ donde se observa la muestra 2A y una tabla con la cantidad de nódulos de grafito presenta en la microestructura.

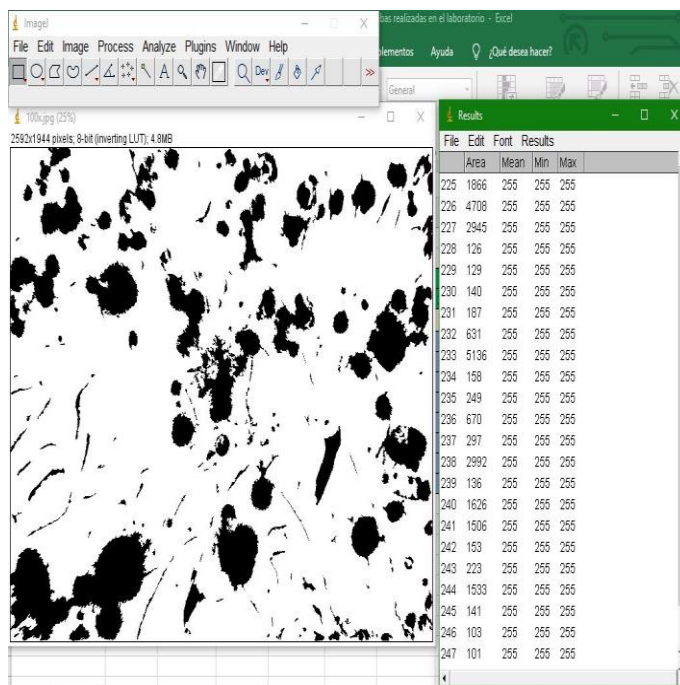


Imagen obtenida del software ImageJ donde se observa la muestra 2B y una tabla con la cantidad de nódulos de grafito presenta en la microestructura.

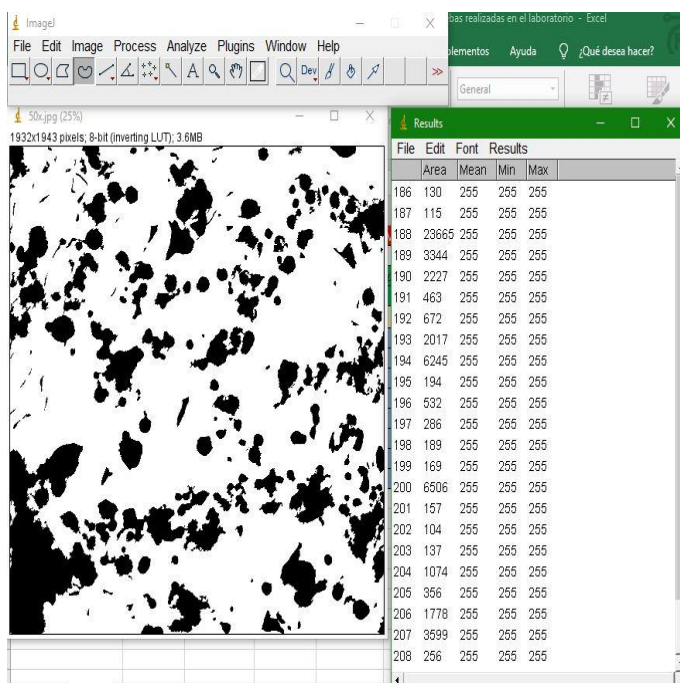


Imagen obtenida del software ImageJ donde se observa la muestra 2C y una tabla con la cantidad de nódulos de grafito presenta en la microestructura.

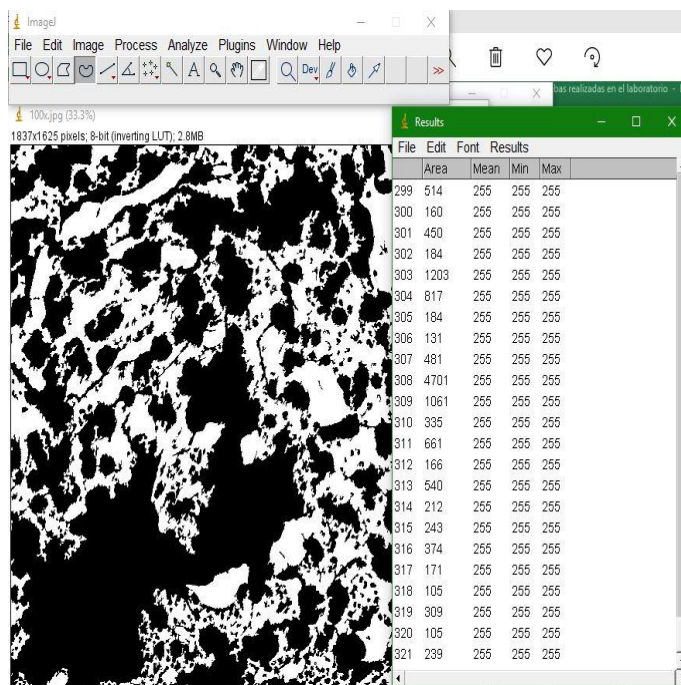


Imagen obtenida del software ImageJ donde se observa la muestra 3A y una tabla con la cantidad de nódulos de grafito presenta en la microestructura.

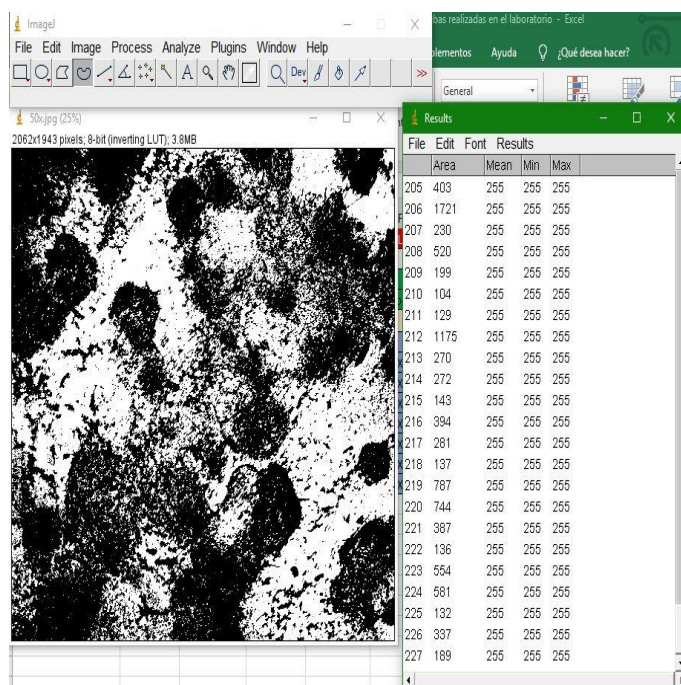


Imagen obtenida del software ImageJ donde se observa la muestra 3C y una tabla con la cantidad de nódulos de grafito presenta en la microestructura.

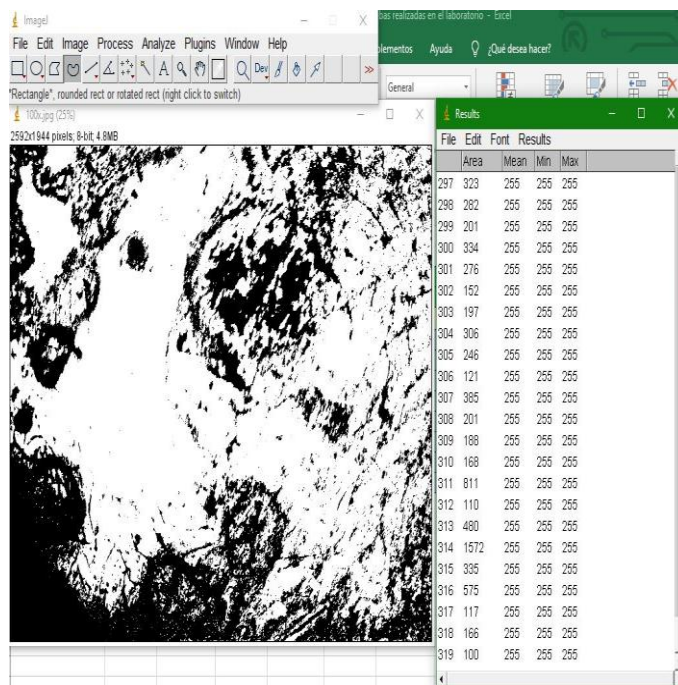
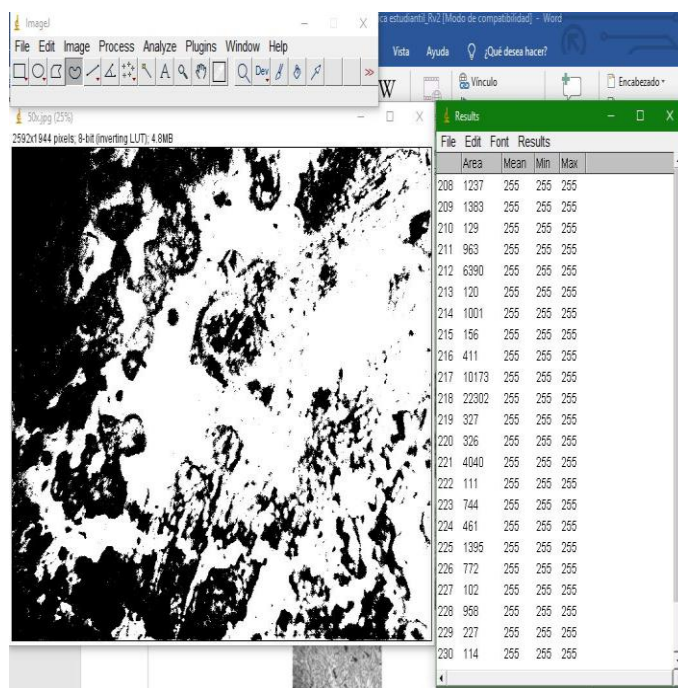
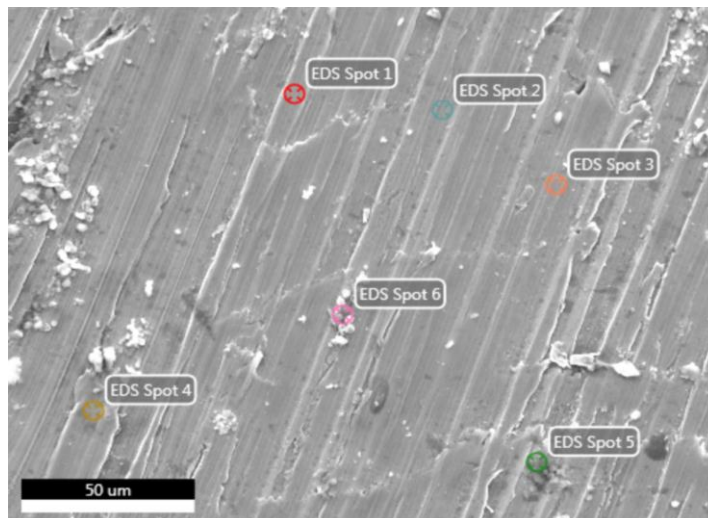


Imagen obtenida del software ImageJ donde se observa la muestra 3B y una tabla con la cantidad de nódulos de grafito presenta en la microestructura.

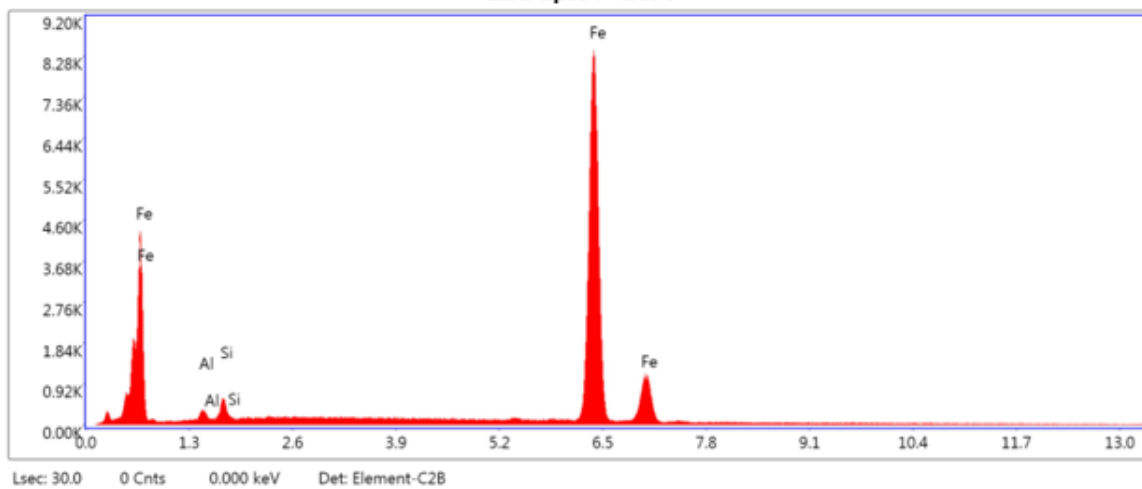


Apéndice B. Análisis de estudios EDS (Microestructura y grafica de cantidad de elementos químicos).

Aquí se presentan los resultados obtenidos en el análisis de EDS realizado a la muestra 3A en diferentes secciones, donde se observa en la microestructura los diversos puntos donde se analizó la cantidad de elementos presentes.

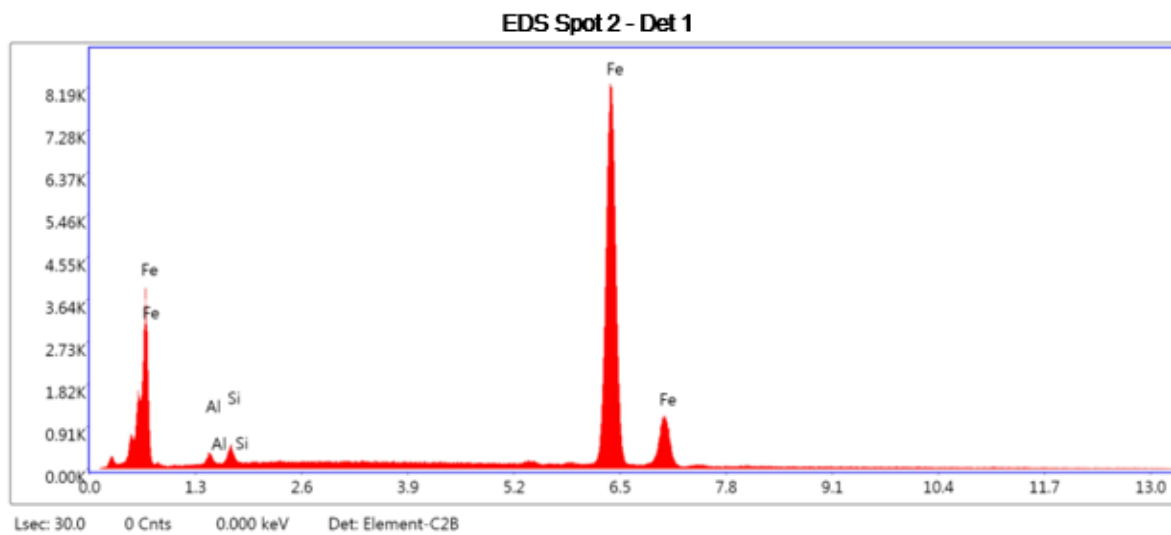


EDS Spot 1 - Det 1



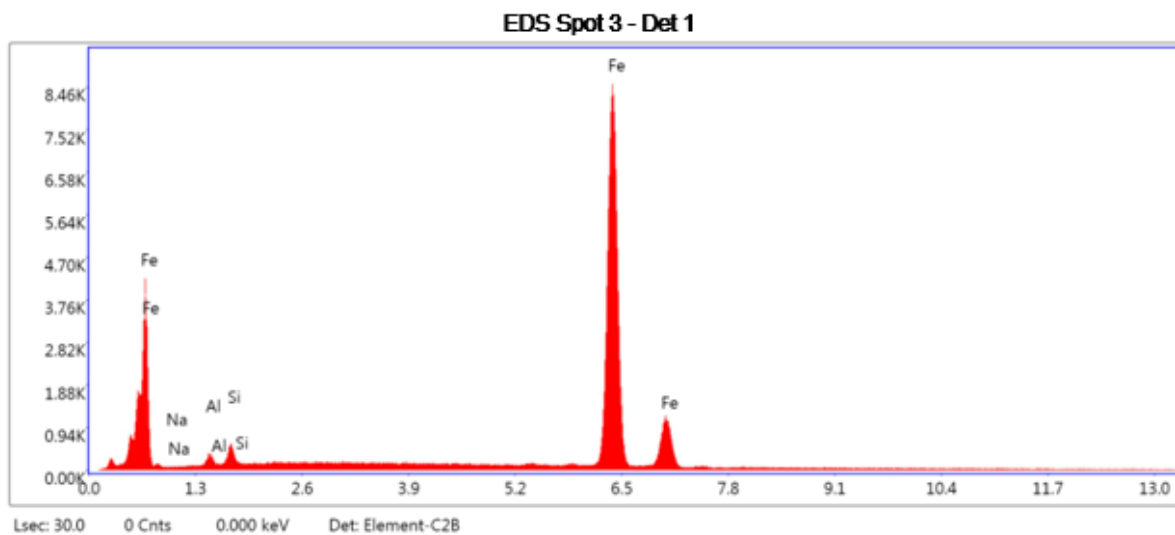
eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Error %
AlK	1.33	2.66	14.69
SiK	1.98	3.80	11.18
FeK	96.70	93.54	1.69



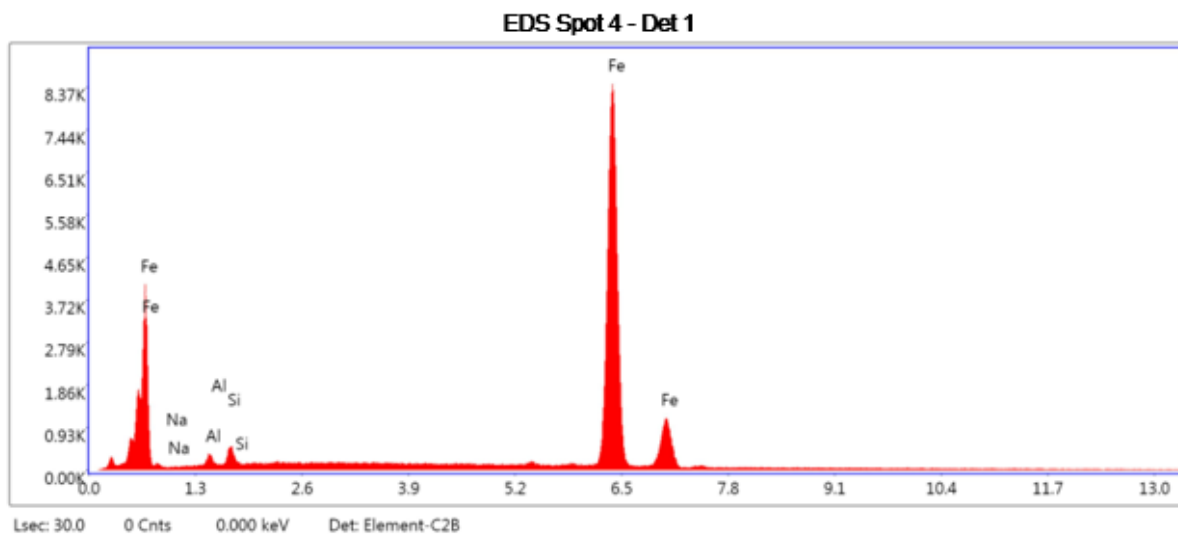
eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Error %
AlK	1.33	2.67	14.67
SiK	1.53	2.95	11.37
FeK	97.15	94.38	1.69



eZAF Smart Quant Results

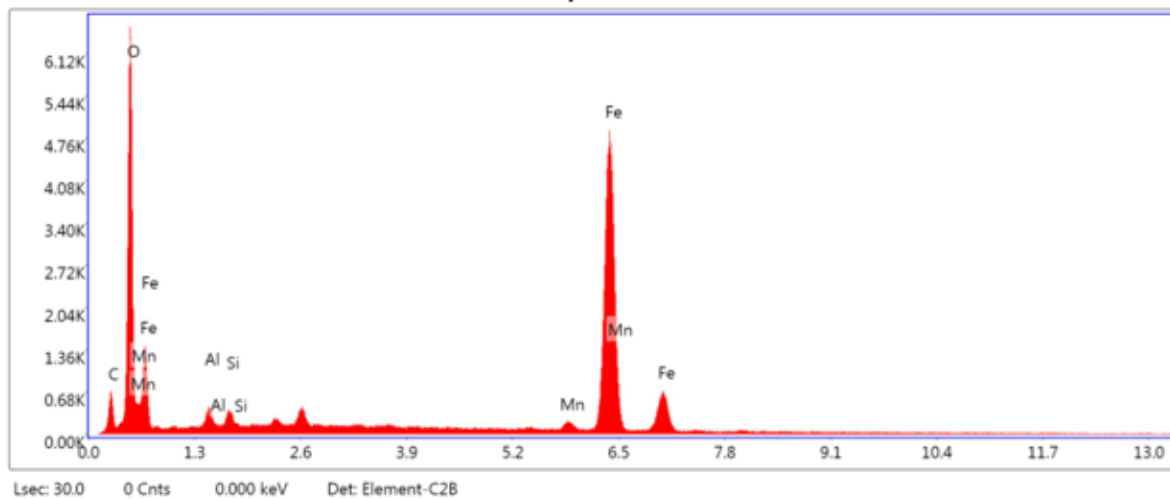
Element	Weight %	Atomic %	Error %
NaK	0.56	1.32	45.55
AlK	1.45	2.88	13.67
SiK	1.84	3.51	11.23
FeK	96.15	92.29	1.69



eZAF Smart Quant Results

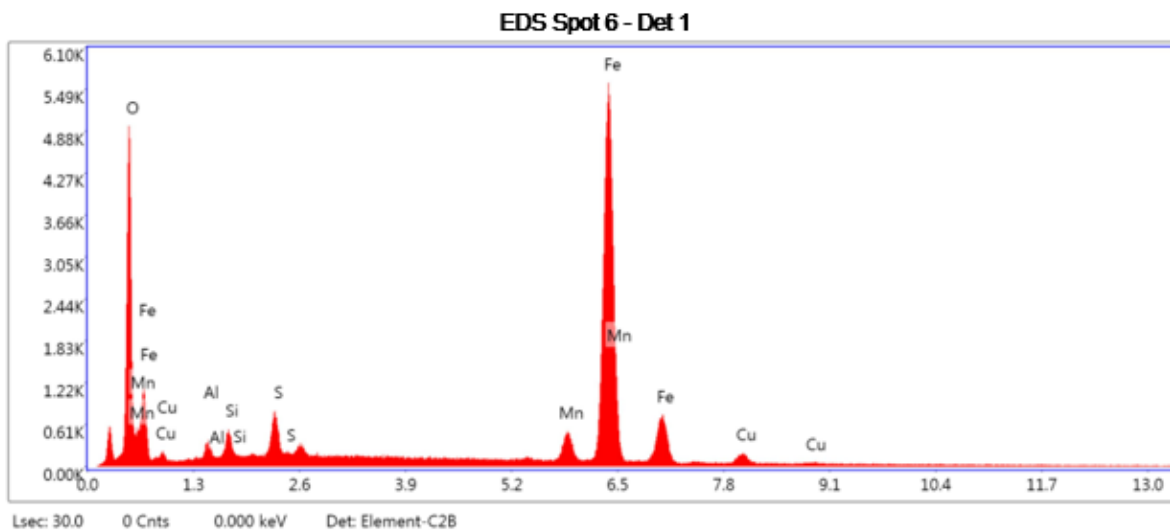
Element	Weight %	Atomic %	Error %
NaK	0.50	1.18	50.61
AlK	1.28	2.56	14.68
SiK	1.66	3.18	11.67
FeK	96.55	93.08	1.68

EDS Spot 5 - Det 1



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Error %
C K	7.32	16.50	11.55
O K	30.96	52.40	7.40
Al K	1.56	1.57	12.20
Si K	0.74	0.72	14.75
Mn K	1.10	0.54	15.24
Fe K	58.32	28.28	1.96



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Error %
O K	21.53	47.51	7.23
AlK	1.37	1.80	12.80
SiK	1.48	1.86	10.53
S K	2.56	2.82	6.53
MnK	3.94	2.53	5.54
FeK	66.16	41.83	1.87
CuK	2.97	1.65	14.76

Apéndice C. Resultados de los análisis por medio Microscopio electrónico de barrido (SEM).

En las siguientes figuras se muestran la microestructura obtenida en la muestra 3A, empleando la técnica de SEM. Las muestras de las microestructuras están a 100X y 1000x.

