

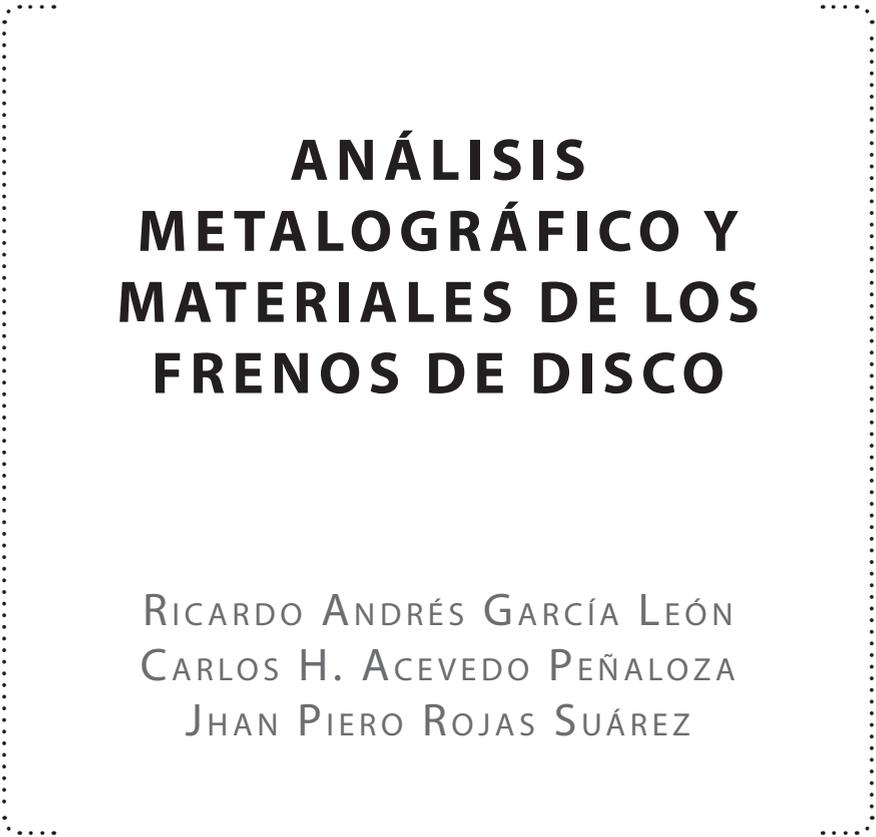


Análisis metalográfico y materiales de los frenos de disco

Ricardo Andrés García León
Carlos Humberto Acevedo Peñaloza
Jhan Piero Rojas Suárez



Universidad Francisco
de Paula Santander
Vigilada Mineducación

A decorative dotted line frame surrounds the central text, consisting of two vertical lines connected by horizontal lines at the top and bottom, with rounded corners.

ANÁLISIS METALOGRAFICO Y MATERIALES DE LOS FRENOS DE DISCO

RICARDO ANDRÉS GARCÍA LEÓN
CARLOS H. ACEVEDO PEÑALOZA
JHAN PIERO ROJAS SUÁREZ

Acevedo Peñaloza, Carlos Humberto

Análisis metalográfico y materiales de los frenos de disco / Carlos Humberto Acevedo Peñaloza, Ricardo Andrés García León, Jean Piero Rojas. -- 1a. ed. -- Bogotá : Ecoe Ediciones ; Cúcuta : Universidad Francisco de Paula Santander, 2019.

73 p. -- (Ingeniería y salud en el trabajo. Ingeniería industrial)

Incluye bibliografía.

ISBN 978-958-8489-99-5

1. Frenos de disco 2. Frenos - Normas técnicas 3. Frenos de disco – Materiales I. García León, Ricardo Andrés

II. Rojas, Jean Piero III. Título IV. Serie

CDD: 629.246 ed. 23

CO-BoBN- a1053039



Colección: Ingeniería y salud en el trabajo

Área: Ingeniería industrial



**Universidad Francisco
de Paula Santander**

Vigilada Mineducación

- ▶ Ricardo Andrés García León
- ▶ Carlos Humberto Acevedo Peñaloza
- ▶ Jhan Piero Rojas Suárez

© Ecoe Ediciones Limitada
www.ecoediciones.com
Carrera 19 # 63C 32, Tel.: 248 14 49
Bogotá, Colombia

© Universidad Francisco
de Paula Santander
Avenida Gran Colombia
No. 12E-96 Barrio Colsag
San José de Cúcuta - Colombia
Teléfono (057)(7) 5776655

Primera edición: Bogotá, noviembre de 2019

e-ISBN: 978-958-8489-99-5

Coordinación editorial: Angélica García Reyes
Corrección de estilo: Carolina Páez
Diagramación: Olga Pedraza
Carátula: Wilson Marulanda Muñoz

*Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio
sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.*

Impreso y hecho en Colombia - Todos los derechos reservados

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	IX
CAPÍTULO 1. CONSIDERACIONES TÉCNICAS	1
NORMAS ASTM	1
ASTM A370-77: Método de ensayo normalizados y definiciones para ensayos mecánicos de productos de acero	1
ASTM A247-67: Método de prueba estándar para la evaluación de la microestructura del grafito en la fundición de hierro	1
ASTM E8M-04: Método de ensayo normalizados para las pruebas de tensión en los materiales metálicos.....	2
ASTM E9-89a: Método de ensayo estándar de compresión de los materiales metálicos a temperatura ambiente	2
ASTM E18-08b: Método de ensayo normalizados para dureza Rockwell de los materiales metálicos	2
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	3
2.1 El Sistema de frenos en el automoviles	3
Disco de freno	3
Geometría de los frenos discos	4
2.2 Composición química de los frenos de disco	6

CAPÍTULO 3. PROPIEDADES MECÁNICAS	9
3.1 Composición química.....	9
3.2 Propiedades mecánicas.....	10
CAPÍTULO 4. PRINCIPALES PROBLEMAS ASOCIADOS	
A LOS FRENOS DE DISCO	15
4.1 Efecto Judder en los discos.....	20
4.2 Corrosión.....	21
4.2.1 Morfología de la corrosión.....	21
CAPÍTULO 5. METALURGIA DE LOS HIERROS	27
5.1 Tipos de fundiciones grises.....	27
5.2 Influencia de los elementos aleantes en las fundiciones o hierros grises.....	30
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS	31
6.1 Características de dureza.....	31
6.2 Análisis metalográfico.....	35
6.3 Selección de las muestras.....	35
6.4 Características estructurales.....	43
6.5 Análisis estructural estático por <i>solidworks</i>	49
BIBLIOGRAFÍA	55
Anexos	57
Anexo A: Norma ASTM 370	57
Anexo B: Norma ASTM E18.....	58
Anexo C: Continuación de la Norma ASTM E18.....	59
Anexo D: Norma ASTM A247	60
Anexo E: Norma ASTM E9.....	61
Anexo F: Resultados de la máquina universal para el disco 1.....	62
Resultados de la máquina universal para el disco 2.....	63
Anexo H: Resultados de la máquina universal para el disco 3.....	64
Anexo I: Resultados de la máquina universal para el disco porción 1	65
Anexo J: Resultados de la máquina universal para el disco porción 2	66

Anexo K: Resultados de la máquina universal para el Disco Porción 3	67
Anexo L: Geometría del disco 1	68
Anexo M: Planos del disco 1.....	69
Anexo N: Geometría del disco 2	70
Anexo O: Planos del disco 2.....	71
Anexo P: Geometría del disco 3	72
Anexo Q: Planos del disco 3.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes de un sistema de freno	4
Figura 2. a) Elementos constitutivos de un disco de freno autoventilado, y b) Diferentes geometrias.	5
Figura 3. Composición química del disco de freno	7
Figura 4. Composición de la pastilla de freno	7
Figura 5. Características de fractura en el disco	10
Figura 6. Relación aproximada entre la resistencia y el módulo de elasticidad de la fundición gris	12
Figura 7. Vibraciones producidas por diferentes fundiciones.....	13
Figura 8. Falla de disco por montaje incorrecto de la pinza	16
Figura 9. Falla por holgura en los rodamientos.....	16
Figura 10. Falla de disco por temperatura excesiva.....	17
Figura 11. Falla por desgaste excesivo del disco	17
Figura 12. Falla por agrietamiento	18
Figura 13. Falla por desgaste excesivo de las pastillas.....	18
Figura 14. Falla por cristalización de las pastillas.....	19
Figura 15. Falla del disco por ralladuras y surcos.....	19

Figura 16. Falla por depósitos de material en los discos	20
Figura 17. Manchas por Cold y Hot Judder en los discos	21
Figura 18. Tipos de corrosión comunes.....	22
Figura 19. Clasificación de la corrosión.....	24
Figura 20. Factores que influyen en la corrosión.....	25
Figura 21. Clasificación de los aceros.....	28
Figura 22. Durómetro digital marca Mitutoyo	32
Figura 23. Cargas para los diferentes tipos de dureza Rockwell.....	32
Figura 24. Selección de muestras para los tres discos.....	32
Figura 25. Dureza Brinell para diferentes fundiciones.	34
Figura 26. Extracción de la probeta para el análisis metalográfico.	35
Figura 27. Cortadora Pico155	36
Figura 28. Montaje de presión TP-7001.....	36
Figura 29. Pulidor automatizado Nano 2000T.....	37
Figura 30. Muestras atacadas con Nital al 2%	38
Figura 31. Microscopio óptico marca Optiks	39
Figura 32. Diagrama de Hierro - Carbono.....	42
Figura 33. Prensa universal Modelo 50 K.....	44
Figura 34. Extracción de las probetas de compresión.....	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Propiedades físico-mecánicas de diferentes frenos de disco	8
Tabla 2.	Grado de hierros grises automotrices para propósitos de diseño por SAE J431	27
Tabla 3.	Rangos de dureza para diferentes hierros grises	28
Tabla 4.	Distribución grafitica	29
Tabla 5.	Dureza Rockwell para los tres discos	33
Tabla 6.	Valores de dureza Rockwell y Brinell	34
Tabla 7.	Proceso de pulido	37
Tabla 8.	Resultados obtenidos en el microscopio	39
Tabla 9.	Características metalográficas de la fundición gris	41
Tabla 10.	Dimensiones de la probeta al inicio del ensayo	45
Tabla 11.	Ensayo de compresión	46
Tabla 12.	Dimensiones de la probeta después del ensayo	47
Tabla 13.	Simulación del ensayo de compresión mediante <i>SolidWorks</i>	48
Tabla 14.	Geometría de los discos	50
Tabla 15.	Deformaciones totales en los discos	51
Tabla 16.	Tensiones de Von Mises para los discos	52
Tabla 17.	Deformaciones elásticas en los discos	53
Tabla 18.	Factor de seguridad en los discos.....	54



INTRODUCCIÓN



Los frenos son elementos fundamentales para mantener la maniobrabilidad y, sobre todo, la seguridad en cualquier vehículo, ya sea de movimiento rotativo o lineal, y la de sus ocupantes. Los sistemas de frenado funcionan aprovechando el rozamiento para desacelerar el cuerpo en movimiento a través del contacto mecánico entre dos superficies. En la actualidad existen diversos tipos de freno según la aplicación: de tambor, de cinta, de disco y cónicos. En particular, para el sector automotriz los más comunes son los de tipo disco en la parte delantera y de tambor en la parte trasera.

Los frenos de disco se diferencian de los demás tipos dado que la fuerza aplicada es normal a la cara del disco y no radial, como en los frenos de tambor y cinta. Otra característica particular es que el momento de fricción no ayuda al momento de accionamiento (efecto autoenergizante), como ocurre en los frenos de tambor y cónicos. Esto permite que los ligeros cambios en el coeficiente de fricción no afecten dramáticamente la fuerza de frenado necesaria para detener el automóvil.

Por ejemplo, una variación de un 30% en el coeficiente de fricción, que es una condición normal en ambientes húmedos, provoca un aumento en la fuerza del 50%, y es por esto que han ido ocupando un lugar muy importante en la industria automotriz, en especial en el mercado de los vehículos comerciales.

Teniendo en cuenta lo anterior, este libro muestra el comportamiento de los frenos de disco, a través del análisis metalográfico y materiales de los cuales son fabricados este tipo de elementos tribológicos, mostrando un procedimiento para su identificación y caracterización bajo diferentes consideraciones según sus condiciones de operación.

Finalmente, se expone el estudio basado en tres geometrías de los frenos de tres vehículos en particular: Renault Megane, Mitsubishi Vans y Toyota Land Cruiser.

CAPÍTULO 1

CONSIDERACIONES TÉCNICAS

Normas ASTM

ASTM A370-77: Método de ensayo normalizados y definiciones para ensayos mecánicos de productos de acero

Este método de ensayo cubren los procedimientos y las definiciones para la prueba mecánica de forjado y fundido en aceros inoxidable 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 A247-67: Método de prueba estándar para la evaluación de la microestructura del grafito en la fundición de hierro

Este método de ensayo trata acerca de la clasificación de grafito de fundiciones en términos del tipo, la distribución y el tamaño de grano. Pretende ser aplicable para todas las aleaciones hierro-carbono que contienen partículas de grafito; por lo que se puede aplicar a fundición gris, hierros maleables y dúctil (fundición nodular).

ASTM E8M-04: Método de ensayo normalizados para las pruebas de tensión en los materiales metálicos

Este métodos de ensayo cubren las pruebas de tensión del metal en materiales de cualquier forma a temperatura ambiente, (Concreto - aleaciones). Asimismo, la determinación de la resistencia a la fluencia, el límite de elasticidad de elongación, la resistencia a la tracción, la elongación, y la reducción de área.

ASTM E9-89a: Método de ensayo estándar de compresión de los materiales metálicos a temperatura ambiente

Este métodos de ensayo cubren los equipos, las muestras, los procedimientos y los cálculos, para las pruebas de compresión axial en la carga de materiales metálicos a temperatura ambiente.

ASTM E18-08b: Método de ensayo normalizados para dureza Rockwell de los materiales metálicos

Este método de ensayo cubre la determinación de la dureza y la dureza superficial de Rockwell de materiales metálicos por la hendidura, principio de dureza Rockwell. Esta norma establece los requisitos para los equipos de dureza Rockwell y los procedimientos para realizar este tipo de pruebas mecánicas.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 El Sistema de frenos en el automóviles

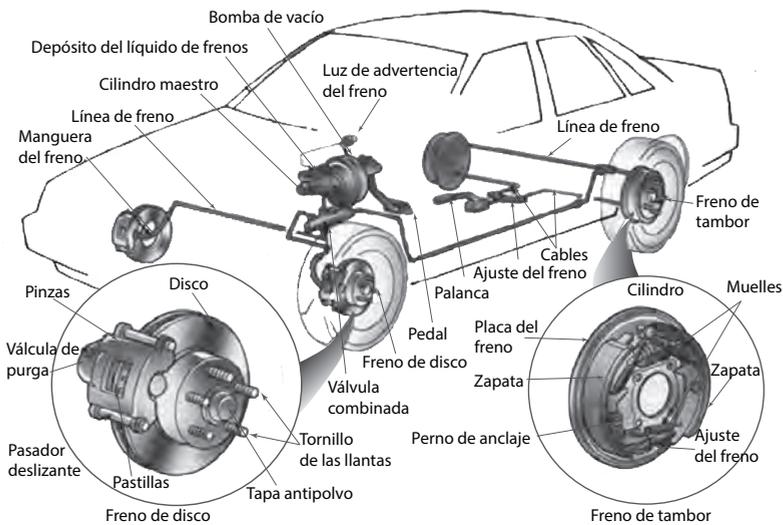
El freno de disco es un sistema de frenado normalmente para ruedas de vehículos, en el cual una parte móvil (el disco), junto con la rueda que gira, es sometida al rozamiento de una superficie de alto coeficiente de fricción (las pastillas), la cual ejerce sobre aquella la fuerza suficiente como para transformar toda o parte de la energía cinética del vehículo en movimiento, en calor, hasta detenerlo o reducir su velocidad, según sea el caso. Esta inmensa cantidad de calor debe ser evacuada de alguna manera y lo más rápidamente posible, lo que depende en gran medida del diseño geométrico y del tipo de material del freno de disco. El mecanismo de los frenos de disco autoventilados es similar al freno de tambor, con la diferencia de que el área de frenado es menor, pero la evacuación del calor al ambiente es mucho más rápida debido a los canales de ventilación. En la Figura 1 se muestra una breve descripción de los componentes de los frenos (Criado, 2012, p. 28).

Disco de freno

El disco de freno es el elemento que se encuentra unido al buje de la rueda, girando en conjunto y constituyendo, por tanto, el elemento móvil del sistema de frenado (Puhn, 2000, p.23).

Asimismo, contra la superficie del disco de freno interactúan las pastillas de fricción en su objetivo de detener el vehículo. El rozamiento continuo que se establece entre pastillas y disco, cuando están en funcionamiento, es el que produce la transformación de la energía cinética (acumulada en el vehículo debido a su velocidad) en energía térmica, lo que genera en muchas ocasiones el aumento de calor en el sistema de frenado (ver figura 1). En este sentido, es muy común en la actualidad que las cuatro llantas de los vehículos utilicen discos de frenos autoventilados (con canales de ventilación).

Figura 1. Componentes de un sistema de freno



Fuente: (Puhn, 2000) (R. A. García-León, Flórez-Solano, & Acevedo-Peñalosa, 2018).

Geometría de los frenos discos

La geometría de los frenos de disco varía dependiendo del tipo de uso del automóvil (figura 2b). En forma general, el freno de disco está conformado por dos pistas de frenado, que junto con la pastilla de freno generan la fricción necesaria para la detención parcial o total del vehículo, este proceso genera un calor considerablemente alto que es evacuado mediante los canales de ventilación que varían de acuerdo a la geometría. Teniendo en cuenta lo anterior, la siguiente Figura 2a muestra los elementos constitutivos de un disco de freno autoventilado:

Figura 2. Frenos de disco**Figura 2a****a) Elementos constitutivos de un disco de freno autoventilado****Figura 2b.****b) Diferentes geometrías**

Fuente: (Puhn, 2000) (R. A. García-León, 2017).

Por otra parte, los frenos de disco se caracterizan por estar formados de una superficie circular (pista de frenado) principalmente. Respecto a la geometría de los frenos de disco, muchas investigaciones han enfocado sus estudios en mejorar la disipación de calor que es generado durante las diferentes etapas de frenado. Teniendo en cuenta la Figura 2a y 2b, a continuación se describen cada una de los elementos constitutivos del freno de disco:

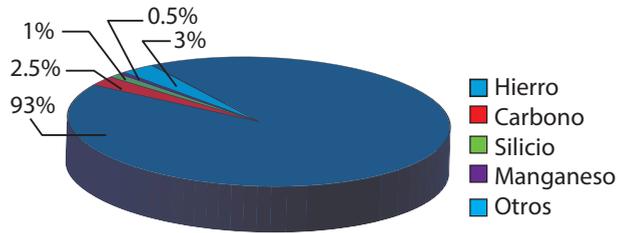
- **Superficie de fricción o pista.** Es la superficie en la que interactúan las pastillas de freno y el disco. Asimismo, esta diseñada para optimizar la potencia de disipación a un valor próximo a 250 W/cm^2 , para un freno de disco macizo. Por otro lado, el valor de la potencia puede aumentar, dependiendo de la geometría del disco, debido a que es si es ventilado el valor de la disipación de potencia aumenta hasta 750 W/cm^2 .

- **Fijación.** Está situada en la parte central, está diseñado con un agujero donde se aloja el buje, en la parte trasera se tiene un chaflán para apoyar el disco de forma perfecta en la mangueta. Alrededor del agujero donde se aloja el buje, se posee unos agujeros de menor tamaño que permiten el paso de los pernos de anclaje de la rueda.
- **Campana.** Es el cilindro que une la banda con el plato de fijación al eje del vehículo.
- **Filtro térmico.** Se trata de un canal mecanizado que separa la pista de la fijación para reducir el calor que pasa de la pista hacia la campana. Con este tipo de canales se evita el excesivo calentamiento de la llanta y por consiguiente del neumático.
- **Canales o ductos de enfriamiento.** Es una zona conformada por alabes para mejorar la evacuación de calor del disco, evitando así un sobrecalentamiento. Estos ductos se encuentran en los discos ventilados, los cuales están compuestos de dos pistas separadas por canales o ductos en su interior, encargados de garantizar la cohesión del disco permitiendo el paso de aire por su interior, y por lo tanto la disipación de calor generada. Debido a estos alabes, el enfriamiento del disco no solo se produce en su superficie exterior, también produce enfriamiento por el interior.

Este intercambio de energía depende en gran medida de la forma y la orientación de los alabes, debido a que en algunos casos estas se oponen al movimiento del aire en su denominado filtro térmico. Por otra parte, se reduce la sección de paso de calor, el gradiente térmico aumenta; es decir, la diferencia de temperatura entre un lado del canal y el otro se hace mayor, lo cual produce que la temperatura de la campana sea menor. Esto es muy importante, debido a que el calor que se transfiere a la llanta y por consiguiente a la goma del neumático, es menor, consiguiendo así que la carcasa del neumático no sufra exceso de temperatura. También se obtiene una reducción en la deformación del disco al reducirse la temperatura de la campana y sus consiguientes tensiones térmicas.

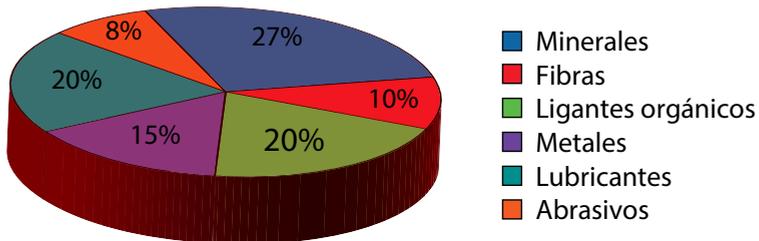
2.2 Composición química de los frenos de disco

La composición básica para la fabricación de los frenos disco, es de una fundición gris nodular de grafito laminar que contiene entre 92 y 93% de hierro. Esta aleación ferrosa comprende, en general, más de 2% de carbono, más de 1.4% de manganeso, menos de 0.6% de silicio y otros componentes que confieren las propiedades específicas del elemento (R. A. García-León & Flórez-Solano, 2017).

Figura 3. Composición química del disco de freno

Fuente: Elaboración propia.

El material de la pastilla de freno debe presentar un coeficiente de fricción elevado para que en su interacción con la superficie del disco pueda disminuir la velocidad de giro de la rueda. Además, dicho coeficiente debe que mantenerse lo más estable posible a cualquier rango de temperatura o presión de contacto con la pista de frenado.

Figura 4. Composición de la pastilla de freno

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. Propiedades físico-mecánicas de diferentes frenos de disco

Propiedad	Valor
Peso del vehículo a plena carga	1,250-1,950-2,250 Kg
Distribución delantera/trasera	70 - 30%
Superficie de la pastilla	3546.03 mm ²
Velocidad del vehículo	80 km/h
Deceleración al frenar	0.6 m/s ²
Presión debido a la fuerza centrífuga	0.73 N/mm ²
Esfuerzo de compresión	2,205 N/mm ²
Fuerza frenante en el centro del empuje	9,626 - 15,016 - 17,326
Esfuerzo de tracción debida a la fricción	122 N/mm ²
Propiedades físicas	
Resistencia a la tracción	240 N/mm ²
Dureza	170-250 HB

Fuente: (R. A. García-León & Perez Rojas, 2017)

CAPÍTULO 3

PROPIEDADES MECÁNICAS

En este capítulo, se identificaron las propiedades mecánicas más importantes de las fundición gris nodular, debido a que es el material utilizado en la fabricación de frenos de disco de los vehículos. Las propiedades más importantes de la fundición gris, al ser el material más implementado en la fabricación de frenos de disco de los vehículos.

3.1 Composición química

Se le llama fundición gris nodular por la forma y color presentes en su estructura (figura 3). Las fundiciones grises son aleaciones de Hierro – Carbono (Fe – C), que contienen generalmente el material matriz compuesto de Silicio – Azufre – Manganeso – Fósforo (Si – S – Mn – P). Además, poseen mayor contenido de carbono que los aceros y adquieren su forma definitiva por moldeo o colado, nunca son sometidas a procesos de deformación plástica ni en frío ni en caliente. Además, no son dúctiles ni maleables, tampoco pueden forjarse ni laminarse (R. García-León, Flórez-Solano, & Suárez-Quñones, 2019).

Por lo general, el contenido de carbono está entre el 2.5 al 4%, siendo más frecuente que pueda variar del 2.75 al 3.5%, el contenido en silicio suele estar del 1 al 3.8% y el de manganeso entre el 0.5 al 1.5%. Muy pocas veces, los contenidos de silicio y manganeso llegan al 4%, en ocasiones se fabrican fundiciones especiales hasta del 15% de silicio. Los porcentajes de azufre suelen estar entre el 0.01 al 0.12%, los de fósforo

entre el 0.020 al 0.10% y, en algunos casos, llegan al 1.5%. Para conseguir ciertas características especiales como, por ejemplo, la dureza y mejorar su estructura molecular, se fabrican fundiciones aleadas que, además de los elementos mencionados se utiliza el cromo, molibdeno, titanio, etc.; las cuales mejoran las propiedades mecánicas de estas fundiciones, pero el costo del disco es mas elevado.

Igualmente, en este tipo de fundiciones grises se generan pocos espacios inde-seados en el proceso de moldeado (rechupe), donde se produce el 1% de con-tracción térmica aproximadamente, al momento de la solidificación del material después del colado, el cual es inferior al de los aceros y las fundiciones blancas. Estas pequeñas contracciones se deben a que su densidad suele estar entre el 6.95 y 7.35 g/cm³, que es menor en cuanto más porcentaje de carbono exista, de esta manera la densidad es más baja en las fundiciones blancas que están en 7.7 g/cm³ y la de los aceros de 7.87 g/cm³.

Figura 5. Características de fractura en el disco



Fuente: (R. A. García-León, Flórez-Solano, & Rodríguez-Castilla, 2019)

Las diferencias entre la fundición gris, respecto a la blanca, radican en su estructura molecular, dado que allí existen inclusiones de grafito cuya cantidad, forma, tamaño y distribución varían según su composición química, lo que da lugar a diferentes tipos de fundiciones grises. Estas fundiciones son un material que además de estar compuesto por grafito y material matriz, está formado por un material intermetálico cerámico (cementita) y otro material metálico (ferrita).

De tal modo que la característica más evidente de las fundiciones grises es que no presentan ledeburita (mezcla eutéctica de hierro fundido que contiene 95.7% de hierro y 4.3% de carbono); además, en su estructura micrográfica aparece el grafito, que puede ser de diversos tipos, disperso en una matriz metálica similar a la de un acero.

3.2 Propiedades mecánicas

Unas de las propiedades mecánicas más importantes para este tipo de fundición son la microestructura, la dureza y la compresión.

El comportamiento mecánico de una fundición gris resulta parecido al de un acero, debido al efecto de numerosas fisuras y grietas llamada micro-entallas, producidas por el grafito generalmente en fundiciones no esferoidales. Por eso el alargamiento a la tracción de las fundiciones grises laminares es pequeño, menor del 0.6%. De este modo la tenacidad de las fundiciones grises es mayor que en las fundiciones blancas, debido a que las cantidades de grafito laminar resultan insuficientes.

Debido a la buena colabilidad que presenta este tipo de fundiciones, es posible moldear piezas de paredes delgadas, tales como: tubos para aletas con radiadores, discos de frenos, rodetes para bombas, anillos para compresores, etc. Se logran estos procesos gracias a los contenidos de la matriz metálica. Para que se genere una buena colabilidad, se requiere que el intervalo de solidificación sea el menor posible entre 0.5 y 1.5 horas, aproximadamente, se encuentra influenciado por la presencia de altos valores de carbono equivalente.

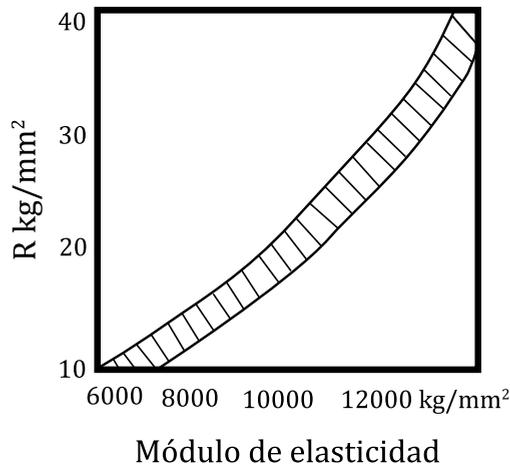
Al realizarse el ensayo de tracción de una fundición gris, se observa que el módulo de elasticidad no es constante como en los aceros, sino que disminuye a medida que aumenta la carga que actúa sobre el material. Por lo tanto no hay, como en los aceros, una zona en la que exista la proporcionalidad entre las cargas y las deformaciones. Por ello, a cada carga que actúa sobre el material corresponde un módulo de elasticidad, al que se designa una carga de 75% de la máxima rotura. Durante los ensayos, en un momento determinado del mismo, se obtiene que:

$$\text{Módulo de elasticidad} = \frac{\text{Carga que está actuando}}{\text{Alargamiento que ha producido}} \text{ (Kg/mm}^2\text{)}$$

En general, el módulo de elasticidad varía entre 7,000 y 13,000 Kg/mm² para estas fundiciones. De tal modo que al disminuir el tamaño y la cantidad de las láminas de grafito, se aumenta el módulo de elasticidad y la resistencia a la tracción, y por lo tanto la dureza las cuales resultan ser excelentes para este tipo de fundiciones (figura 6).

Por otra parte, en el proceso de tracción se genera el alargamiento plástico y permanente de muestras, el cual es muy pequeño en la mayoría de las fundiciones grises ordinarias, puede decirse que es casi nulo, debido a que no suele llegar al 1%; mientras que en los aceros son normales alargamientos que varíen entre 10 y 20%.

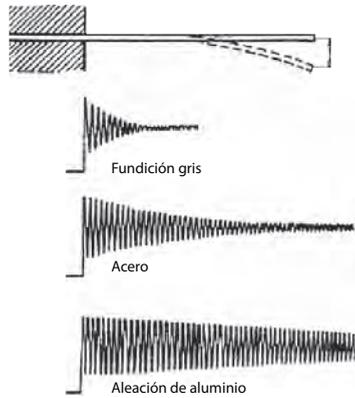
Figura 6. Relación aproximada entre la resistencia y el módulo de elasticidad de la fundición gris



Fuente: (Ashby y Jones, 2008).

A causa de las láminas de grafito presentes en el material, se producen un gran número de discontinuidades en la estructura, lo cual hace que las fundiciones grises sean menos sensibles al efecto de la entalla por la presencia de las láminas de grafito que, entre mayor sea su cantidad, poseen mejor capacidad de amortiguación a las vibraciones, caso contrario ocurre con los aceros.

En la Figura 7, se representan esquemáticamente las vibraciones producidas en las mismas condiciones de diferentes materiales, tales como: varillas de fundición gris, de acero y de aleación de aluminio. Se observa que las vibraciones que se amortiguan en la fundición gris son mucho más evidentes que en el acero y que en la aleación de aluminio, lo cual es muy importante en lo que respecta al emplear este tipo material en la fabricación de motores y elementos que soporten altos niveles de vibraciones.

Figura 7. Vibraciones producidas por diferentes fundiciones

Fuente: (Ashby y Jones, 2008).

La conductividad térmica de las fundiciones grises es aproximadamente 46 w/m-K superior a la de los aceros, en ello influye el grafito, que es buen conductor. La capacidad para disipar calor es alta en las fundiciones grises, en cuanto mayor sea la cantidad de grafito; resulta mejor si el grafito es laminar y no esferoidal. Por esta razón las lingoteras aprovechan esta propiedad y fabrican la fundición gris hipereutéctica.

Asimismo, el coeficiente de dilatación térmica es aproximadamente de 13 $\mu\text{m}/\text{m}$, entre 0 y 500°C, y de 10.5 $\mu\text{m}/\text{m}$ en el rango de 0 y 100°C. Aunque parecido al del hierro, resulta ser menor al obtener un valor de 11 $\mu\text{m}/\text{m}$ para el Fe α (alfa) y 18 $\mu\text{m}/\text{m}$ para el Fe γ (gamma). Estas fundiciones poseen alta resistencia al choque térmico, el cual resulta mejor para altos contenidos en carbono.

CAPÍTULO 4

PRINCIPALES PROBLEMAS ASOCIADOS A LOS FRENOS DE DISCO

El estudio de los diferentes problemas de los discos demuestra que la mayoría de ellos podrían evitarse si se prestara más atención al montaje, estudio de la microestructura del material, elementos de aleación y fundamentalmente la geometría. Esto no solo concierne a ciertos controles cuantificables mediante mediciones, sino que además se debe realizar un atento examen visual de los componentes. La solución a todos los problemas, que en este apartado se describen, es la sustitución de los discos de freno, así como las pastillas (Roadhause, 2013, p. 10).

Apriete incorrecto. El apriete excesivo de los discos genera grietas en la superficie de la campana que se apoya sobre el buje. Estas grietas pueden no ser visibles o ser simplemente un principio de deformación, que con el paso del tiempo y los continuos cambios de temperatura producen, en casos extremos, que se acabe desprendiendo la campana de la banda frenante. Este problema también se produce por no respetar ni el orden de apriete ni las presiones de apriete para los neumáticos.

Montaje incorrecto de la pinza. Si la pinza no ha sido colocada correctamente en su posición, se aprecia un desgaste irregular de las pastillas en forma cónica y anti simétrica, como se observa en la Figura 8.

Figura 8. Falla de disco por montaje incorrecto de la pinza



Fuente: (Roadhouse. 2013).

Limpieza incorrecta del buje. En caso que durante el montaje de un disco nuevo no se limpia correctamente la superficie de apoyo del disco en el buje, se puede producir un asentamiento inestable del disco en el buje. Esto provoca que al girar el disco se produzca una oscilación del mismo que, en cada giro, roce contra las pastillas provocando no solo el desgaste excesivo de las pastillas, sino el deterioro del disco.

Excesiva holgura de los rodamientos del buje. La excesiva holgura de los rodamientos del buje provoca un desgaste irregular de las bandas frenantes de los discos. En la Figura 9 se observa un recalentamiento del disco localizado en la zona donde rozan las pastillas al girar este, debido a la holgura en los rodamientos del buje, se aprecia también un desgaste excesivo en la zona en la que el contacto es permanente. Además, se manifiestan vibraciones frecuentes desde el principio hasta que al final son mas graves.

Figura 9. Falla por holgura en los rodamientos



Fuente: (Roadhouse. 2013).

Temperatura excesiva. Los discos presentan vivos colores en la zona del filtro térmico donde se unen las pistas frenantes con la campana. Esta zona cambia de color al sufrir un calentamiento excesivo que transforma la estructura del material, como se muestra en la Figura 10.

Figura 10. Falla de disco por temperatura excesiva



Fuente: (Roadhouse. 2013).

Desgaste por encima del límite máximo. Cuando el disco ha sido usado más allá de su vida útil, es decir, al sobrepasar el espesor mínimo expresado por el fabricante, aparece un escalón en las pistas del disco que provoca una reducción de la masa del disco. Esto produce una mala disipación del calor, debido a la pérdida de masa comentada anteriormente. Lo anterior, llevará a un calentamiento excesivo que provoca la aparición de grietas, así como manchas de color más oscuro, dado el sobrecalentamiento de dichas zonas, como se muestra en la Figura 11.

Figura 11. Falla por desgaste excesivo del disco



Fuente: (Roadhouse. 2013).

Discos agrietados. Los discos han sido sometidos a temperaturas de funcionamiento muy altas, en su parte exterior se ven claros síntomas de sobrecalentamiento. Las altas temperaturas favorecen la aparición de las grietas que se forman al existir pequeños poros en el material, los cuales, debido a las altas temperaturas, crecerán hasta formar un agrietamiento severo. Las grietas hacen que el disco sea frágil, lo cual, en definitiva, favorece el crecimiento de la grieta hasta romper el disco, como se muestra en la Figura 12.

Figura 12. Falla por agrietamiento



Fuente: (Roadhouse. 2013).

Desgaste excesivo de los discos por el desgaste total de las pastillas. Si las pastillas se han desgastado tanto que se ha dado un contacto metal – metal, entre el disco y el soporte de la pastilla, se aprecia un desgaste abrasivo que deja unos surcos muy pronunciados, también se observa una transformación de material entre el disco, debido a que aparecen zonas oscuras que se observa en la Figura 13.

Figura 13. Falla por desgaste excesivo de las pastillas



Fuente: (Roadhouse. 2013).

Disco dañado por material de fricción vitrificado. Este problema es causado al usar materiales de fricción de baja calidad en vehículos muy exigentes con el proceso de frenado, debido a sus altas prestaciones, al ser vehículos dedicados al reparto u otras condiciones extremas impuestas por el conductor, esto se observa en la Figura 14.

Figura 14. Falla por cristalización de las pastillas

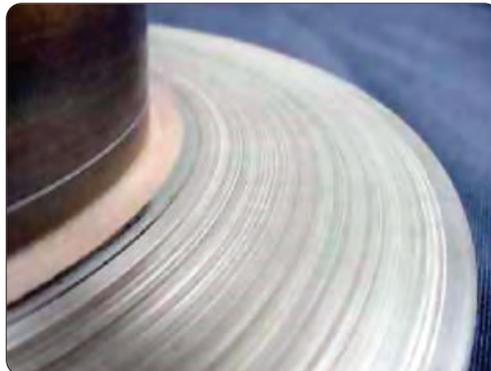


Fuente: (Roadhouse. 2013).

Surcos y rayas profundas. La formación de rayas o surcos profundos en forma de arado, por el genoma de arado, puede haber sido causada por la interposición de diferentes materiales extraños entre la pastilla y el disco (Fenomeno de 3 cuerpos. Disco, pastilla y partículas de desgaste “debris”).

También es posible que sean provocadas por una acumulación del material duro de la pastilla al tener un mal proceso de mezclado o por elementos extraños durante la movilización del vehículo, como se muestra en la Figura 15.

Figura 15. Falla del disco por ralladuras y surcos



Fuente: (Roadhouse. 2013).

Depósitos del material de fricción en los discos. Se forman estos depósitos porque los materiales han quedado adheridos sobre el disco debido a una alta temperatura. Se aprecian vibraciones muy leves en un principio, dependiendo de la presión de frenado que se observa en la Figura 16.

Figura 16. Falla por depósitos de material en los discos

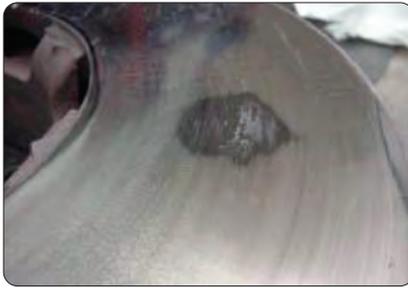


Fuente: (Roadhouse, 2013).

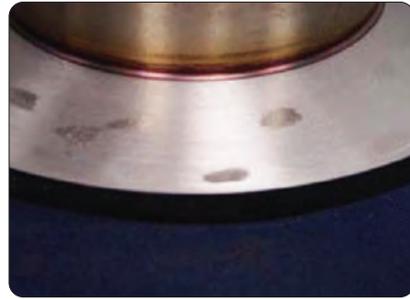
4.1 Efecto Judder en los discos

Las vibraciones del *judder* frío, *cold judder*, son provocadas por imperfecciones de los discos, tales como: defectos de mecanizado en origen, defectos de montaje u holguras excesivas; es decir todas aquellas causas que provoquen un aumento de la deformación del disco. Este cold judder se suele ocasionar a baja presión y baja deceleración, lo cual se observa en la Figura 17a.

Las vibraciones del *judder* caliente, *hot judder*, aparecen a alta temperatura durante procesos de frenado a presiones medias y velocidades altas, debido a que las frenadas en estas condiciones se alargan mucho en el tiempo y la temperatura aumenta considerablemente, hasta valores de 400 a 500°C, lo cual se observa en la Figura 17b.

Figura 17. Manchas por Cold y Hot Judder en los discos

17a
a) Manchas por cold



17b
b) hot judder en los discos

Fuente: (Roadhouse. 2013).

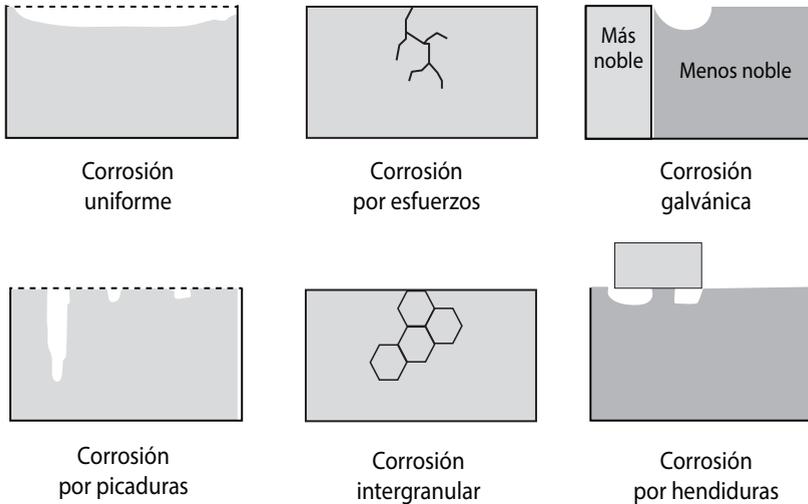
4.2 Corrosión

La corrosión es un fenómeno espontáneo que se presenta, prácticamente, en todos los materiales procesados por el hombre. Sin embargo, existen varias definiciones, es común describir la corrosión como una oxidación acelerada y continua que desgasta, deteriora e, incluso puede afectar la integridad física de los objetos o las estructuras. Este fenómeno tiene implicaciones industriales muy importantes: la degradación de los materiales que provoca interrupciones en actividades fabriles; la pérdida de productos; la contaminación ambiental; la reducción en la eficiencia de los procesos; los mantenimientos y el sobre-diseños costosos. Por esta razón, cada día se desarrollan nuevos recubrimientos, se mejoran los diseños de las estructuras, se crean nuevos materiales, se sintetizan mejores inhibidores y se optimizan los sistemas de monitoreo. Todo esto en un esfuerzo permanente por minimizar el impacto negativo de la corrosión (Uhlig's, 2000, p. 94).

4.2.1 Morfología de la corrosión

La batalla contra la corrosión de los materiales se desarrolla en el campo de la termodinámica, por eso es una batalla pérdida. El hombre solamente puede prolongar la vida útil de sus herramientas y sus estructuras, puede aliarse con la cinética y hacer creer que existen los aceros inoxidables, las pinturas anticorrosivas y los inhibidores de corrosión (Bilurbina, *et al.* 1996, p. 57). Las maneras en que se produce la corrosión son:

Figura 18. Tipos de corrosión comunes



Fuente: (Goldin, 1998).

- **Corrosión uniforme.** Se manifiesta con igual velocidad en todos los puntos del metal. Se observa tanto en el caso de la corrosión seca como de corrosión en medio húmedo.
- **Corrosión por esfuerzo.** Este fenómeno ocurre cuando el material se fractura por la presencia de un medio corrosivo. Aquellos materiales que son sensibles a la aplicación de cargas pueden agrietarse al estar sujetos, simultáneamente, a esfuerzos y agentes corrosivos específicos en un rango alto de temperatura. Las grietas típicas comienzan en rendijas interangulares, las cuales aparecen en el metal a través de los granos (grieta transgranular) o entre ellos (intergranular), dependiendo de las condiciones.
- **Corrosión galvánica.** Es un proceso electroquímico en el cual un metal se corroe, preferentemente, cuando está en contacto eléctrico con un tipo diferente de metal (más noble); además, ambos metales se encuentran inmersos en un electrolito o medio húmedo.
- **Corrosión por picaduras.** Este tipo de corrosión puede tener diferentes causas, en particular la existencia de una solución de continuidad en una capa protectora que recubre el metal o la presencia en la superficie de pequeñas gotas de un electrolito. Aunque la cantidad de metal atacado sea pequeña, este tipo de corrosión es peligroso, debido a que se produce en profundidad y perfora rápidamente gruesas estructuras.
- **Corrosión intergranular.** Generalmente se debe a la precipitación de una fase o a la formación preferente de un producto de corrosión en las

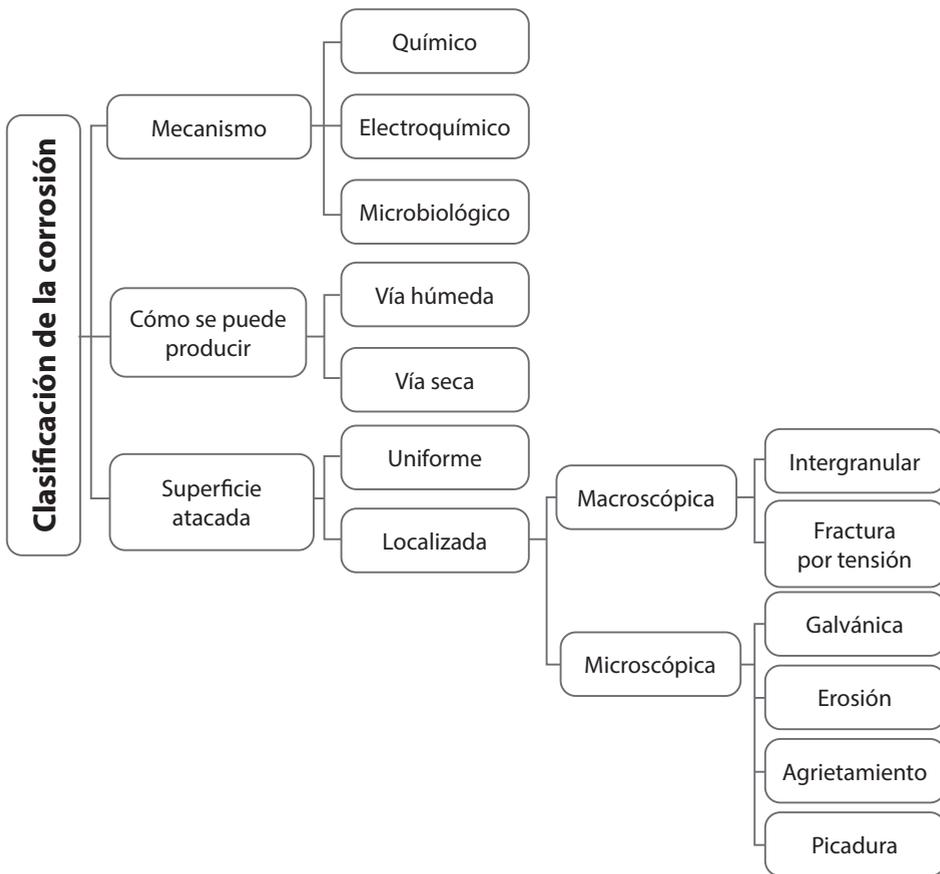
juntas de granos. Esta forma de corrosión es un poco engañosa, debido a que la cantidad de metal afectada por ella es pequeña, pero las condiciones mecánicas del material se ven estropeadas por la formación de innumerables fisuras que se generan, debilitando así el material.

- **Corrosión por hendiduras.** Es el proceso de corrosión acelerado y altamente localizado en lugares como: solapas, ranuras dejadas por tuercas, cabezas de tornillos, grietas, etc., allí, pequeños volúmenes de fluido son atrapados y puestos en contacto con el material. En general, este ataque ocurre en aquellos sitios donde un metal está sujeto a cambios de condiciones, sean enterrados o sumergidos.
- **Erosión.** Es el ataque químico mecánico acelerado que resulta cuando el flujo de material abrasivo se desgasta continuamente por acción mecánica, a la vez que expone material nuevo y no protegido al medio corrosivo. En aquellos casos en que los metales están protegidos por finas películas protectoras antióxido, estos son removidos por la alta velocidad o por el flujo turbulento de gases y fluidos, aumentándose así la tasa de corrosión.
- **Efecto de las variables ambientales.** La corrosión implica la interacción (reacción) entre un metal o aleación y el ambiente que lo rodea. Las variables ambientales más importantes por las que la corrosión se ve afectada son: el pH (acidez), la fuerza oxidante (potencial), la temperatura (transferencia de calor) y la concentración (constituyentes en disolución). Otro aspecto de importante consideración es la influencia de organismos biológicos (Goldin, 1998, p. 78).
- **Efecto del pH.** El concepto del pH está relacionado con la concentración de hidrógeno o la cantidad de ácido. Muchas aleaciones de interés comercial forman una capa oxidada que contiene diversos tipos de hidróxido cuando se encuentran en presencia de agua. En el caso del acero, la velocidad de corrosión es elevada a pH muy bajo.
- **Efecto del potencial.** El potencial se relaciona con la capacidad para añadir o retirar electrones del metal con la finalidad de oxidar la superficie. Algunas aplicaciones prácticas incluyen el incremento de la pasividad, alterando la superficie oxidada (protección anódica); o la prevención de la corrosión con la provisión de electrones al metal afectado por la corrosión (protección catódica).
- **Efecto de la temperatura.** La temperatura puede afectar a la corrosión de diversas maneras. Si la velocidad de corrosión está gobernada completamente por el proceso elemental de la oxidación del metal, dicha velocidad crece rápidamente con un incremento de la temperatura.
- **Efecto de la concentración.** De la misma forma que el pH, la concentración de distintos constituyentes puede influenciar el comportamiento de la

corrosión. Por ejemplo, los yoduros y bromuros pueden inhibir la corrosión; mientras que la presencia de cloruros aumenta la velocidad de corrosión de forma proporcional a su concentración.

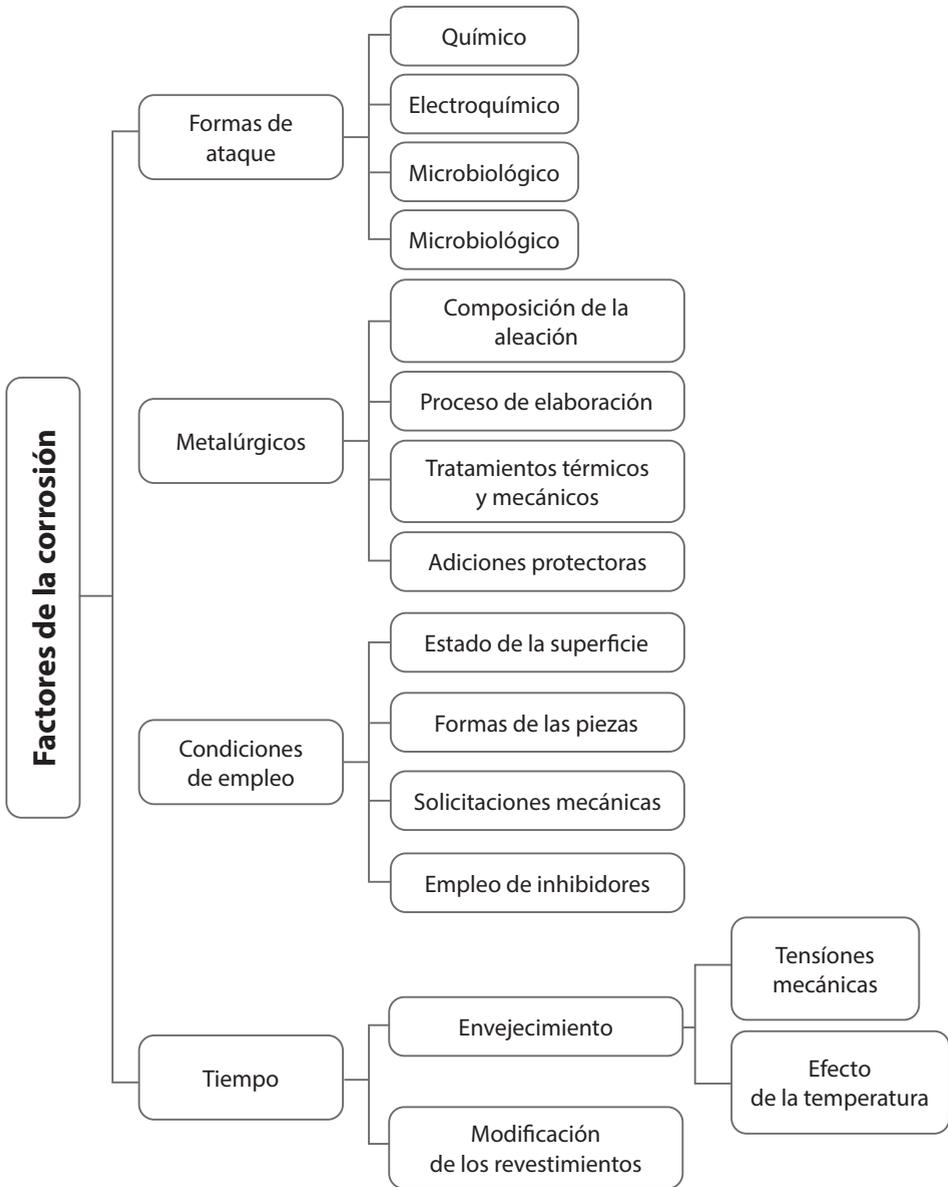
- **Efectos biológicos.** La tendencia de estos organismos es atacar y crecer en la superficie del material, dando lugar a la formación de películas biológicas o *biofilms* que influyen en la corrosión de los metales, debido a que los organismos tienen la capacidad de modificar las variables ambientales discutidas previamente.
- **Efecto de las variables metalúrgicas.** La estructura y la composición de metales y aleaciones son de básica importancia en la determinación de los procesos de corrosión. Por lo tanto, la estructura cristalina, el tipo de aleación y el tratamiento térmico empleado, desempeñan un papel fundamental frente a la corrosión.

Figura 19. Clasificación de la corrosión



Fuente: Elaboración propia.

Figura 20. Factores que influyen en la corrosión



Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 5

METALURGIA DE LOS HIERROS

5.1 Tipos de fundiciones grises

Las principales propiedades física y mecánicas para los hierros son: esfuerzo tensil, módulo de elasticidad, facilidad a la maquinabilidad, dureza, esfuerzo al impacto, resistencia a la fatiga, resistencia al desgaste y resistencia a la corrosión y abrasión. Dependiendo de las propiedades buscadas, cada parte se somete a las pruebas pertinentes para cada propósito. Dentro de la industria automotriz el uso de técnicas y estándares establecidos facilitan el diseño de cada componente, algunas de las normas más usuales e importantes para este tipo de industria son ASTM, AFS, SAE, etc. Las American Standard Testing Materials (ASTM), están referenciadas en la tabla 2, donde se muestran los principales grados de los hierros para la industria automotriz (Ashby y Jones, 2008, p. 912).

Tabla 2. Grado de hierros grises automotrices para propósitos de diseño por SAE J431

Grado SAE	Dureza HB	Esfuerzo máximo		Otros requerimientos
		Psi	MPa	
G1800	187	18,000	124	
G2500	170-229	25,000	173	
G2500**	170-229	25,000	173	3.4% de carbono mínimo y microestructura especificada.
G3000	187-241	30,000	207	
G3500	207-255	35,000	241	

Grado SAE	Dureza HB	Esfuerzo máximo		Otros requerimientos
		Psi	MPa	
G3500b**	207-255	35,000	241	3.4% de carbono mínimo y microestructura especificada.
G3500c**	207-255	35,000	241	3.4% de carbono mínimo y microestructura especificada.
G4000	217-269	40,000	276	

** Para aplicaciones, tales como: discos, tambores de freno o platos de embragues resistentes a choques térmicos.

Fuente: (Ashby y Jones, 2008).

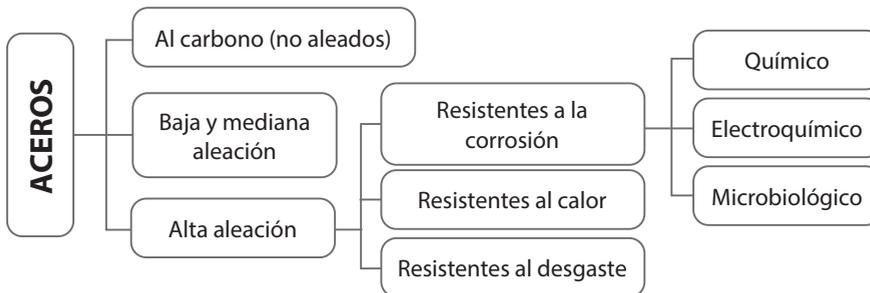
En la tabla 3 se muestran los rangos de durezas para diferentes hierros o fundiciones grises laminares en función de su microestructura y de la capacidad del amortiguamiento a las vibraciones para algunas aleaciones ferrosas.

Tabla 3. Rangos de dureza para diferentes hierros grises

Tipo de hierro gris	Microestructura	Dureza HB
Recocido suave	Ferrítico total	110 - 140
Ordinario	Perlítico-ferrítico	140 - 200
Alto esfuerzo	Perlita fina	200 - 270
Aleación acicular	Bainita	260 - 350
Austenítico	Austenita	140 - 160
Endurecido por tratamiento térmico	Martensita	480 - 550
Endurecido y templado	Martensita templada	250 - 450
Templado (hierro blanco)	Perlita y carburos	400 - 500

Fuente: (Ashby y Jones, 2008).

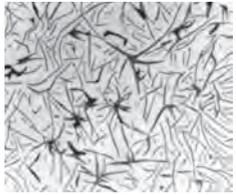
Figura 21. Clasificación de los aceros



Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la clasificación de los aceros (figura 19), se debe considerar además la morfología y distribución de las hojuelas de grafito en los hierros grises. Las grandes hojuelas de grafito interrumpen seriamente la continuidad de la matriz perlítica, reduciendo de esta manera la resistencia y la ductilidad del hierro gris. Las pequeñas hojuelas de grafito son menos dañinas, por lo tanto, en general se prefieren con altos o bajos contenidos dependiendo de la aplicación. La distribución grafitica está clasificada en 5 tipos, como lo muestra la tabla 4.

Tabla 4. Distribución grafitica

Distribución del grafito	Tipo
	<p>Tipo A. La distribución del grafito se caracteriza por una distribución uniforme de las hojuelas sin una orientación ordenada.</p>
	<p>Tipo B. La distribución del grafito se caracteriza por formar grupos de rosetas sin una orientación ordenada.</p>
	<p>Tipo C. La distribución del grafito se caracteriza por hojuelas grandes superpuestas entre sí sin una orientación ordenada.</p>
	<p>Tipo D. La distribución del grafito se caracteriza por presentar segregación interdendrítica sin una orientación ordenada.</p>
	<p>Tipo E. La distribución del grafito se caracteriza por presentar segregación interdendrítica con una orientación preferida</p>

Fuente: (Ashby y Jones, 2008).

5.2 Influencia de los elementos aleantes en las fundiciones o hierros grises

Al hierro que contiene otros elementos, además del C, Si, Mn, P y S, se le denomina hierro aleado. Normalmente, los hierros se combinan con los siguientes elementos: Cr, Ni, Mo, Sn, Cu, V, Ti y Al. En muchos hierros la interacción con los elementos aleantes, incluyendo el silicio y el carbono, tienen grandes efectos en sus propiedades mecánicas. Esta influencia es tan grande como la cantidad, la forma y el tamaño de las hojuelas de grafito presentes en los hierros. Por ejemplo, la profundidad del temple o la tendencia del hierro a ser hierro blanco dependen del carbono equivalente, de esta manera, el balance del carbono, el silicio y la adición de otros elementos pueden modificar únicamente la tendencia básica establecida por la relación carbono-silicio. En general, solo pequeñas cantidades de elementos aleantes son necesarios para mejorar la profundidad al temple, dureza y resistencia.

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

A continuación, se analizaron las propiedades mecánicas respecto a la dureza, microestructura y resistencia a la compresión. Asimismo, el análisis por elementos finitos a través de una análisis estructural estático y térmico para los tres discos estudiados.

6.1 Características de dureza

La prueba de dureza Rockwell se realizó en el laboratorio de Materiales Metálicos de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, en el durómetro digital marca Mitutoyo que cuenta con una capacidad de 150 KgF (ver figura 22), los datos fueron tomados según la norma ASTM E18 y ASTM A370, para la realización de este ensayo (presente en los ANEXOS A, B y C). La condición fue una carga de 100 KgF con un penetrador de bola de hierro de 1/16 mm, de esta manera, dependiendo de la dimensión de la muestra, se tomaron los diferentes puntos de referencia sobre la superficie (ver figura 23).

Como lo indica la Norma ASTM E18, se deben tomar varios puntos de referencia de dureza a lo largo de la superficie del material (ver figura 24) y luego determinar un promedio para determinar un promedio y darle la validez estadística respecto al material ensayado; el cual, debido a que es muy blando, estableció la prueba de dureza Rockwell B, donde se obtuvieron los siguientes resultados:

Figura 22. Durómetro digital marca Mitutoyo



Fuente: elaboración propia.

Figura 23. Cargas para los diferentes tipos de dureza Rockwell



Fuente: elaboración propia.

Figura 24. Selección de muestras para los tres discos



Fuente: elaboración propia.

La siguiente ecuación, se utilizó para evaluar el promedio de las durezas tomadas en los diferentes puntos de la muestra:

$$H = \frac{H_1 + H_2 + H_n}{n}$$

Donde:

H_1, H_2, H_n = Puntos de dureza
 n = Número de punto.

Las medidas de dureza son interesantes para predeterminar la resistencia al desgaste de una fundición gris. Además, proporcionan un primer criterio sobre su comportamiento al mecanizado o maquinabilidad. A diferencia de los aceros, las fundiciones no tienen una proporcionalidad directa entre dureza y resistencia a la tracción.

Tabla 5. Dureza Rockwell para los tres discos

Muestra	Disco 1	Disco 2	Disco 3
Punto	Valor HRB		
1	81.9	80.4	70.6
2	85.2	85.7	71.5
3	87.4	80.7	69.9
4	88.3	77.3	87.0
5	84.2	76.0	86.5
6	82.8	82.4	80.4
7	82.9	80.5	90.8
8	---	78.7	90.9
9	---	---	90.0
Promedio	84.7	80.2	82.0

Fuente: elaboración propia.

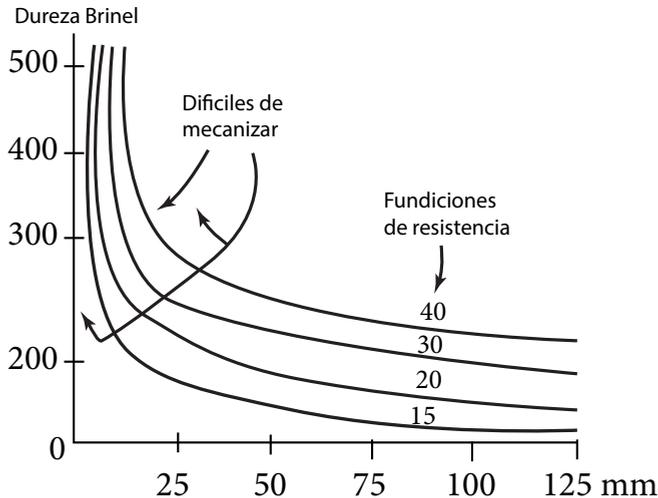
Luego de la realización del ensayo se tuvo en cuenta la Norma ASTM 370 para convertir el valor de dureza Rockwell en dureza Brinell, se tomaron diferentes puntos de referencia en cada muestra del disco, debido a que cada uno variaba en su geometría.

Tabla 6. Valores de dureza Rockwell y Brinell

Muestra	Disco 1	Disco 2	Disco 3
Valor promedio HRB	84.7	80.2	82.0
Valor HB	164	151	156

Fuente: elaboración propia.

De la anterior tabla 6, se pueden obtener los valores de las durezas Brinell para los diferentes tipos de fundiciones. En el caso de la fundición gris, se determinó que posee una dureza entre 140 y 250 Brinell, obteniendo así que los tres discos son de fundición gris nodular. La siguiente Figura 25, muestra el comportamiento de la dureza Brinell durante el proceso de mecanizado.

Figura 25. Dureza Brinell para diferentes fundiciones.

Fuente: (Ashby y Jones, 2008).

Debido a las diferencias de temperatura que sufre el disco de freno, este experimenta cambios en sus propiedades, las cuales se ven reflejadas en el disco 1 y 2 que no mantuvieron las características del filtro térmico, al cual es sometido el disco en la base de la campana para no transferir calor al mismo; caso contrario ocurre con el disco 3 que mantuvo las características de dureza a las cuales se ven sometidos los discos por la acción del filtro térmico. Además, estas muestras de dureza están por debajo de los límites de maquinabilidad, haciendo que este tipo de material sea fácil de maquinar y por lo tanto menos resistente al desgaste.

El cambio térmico al que están sometidos los discos por el efecto de la fricción entre el disco y la pastilla interfieren en variaciones en la microestructura del material y en sus propiedades mecánicas intrínsecas, de esta manera se genera la

perdida de dureza, aceleración de la corrosión y de las demás propiedades físico-mecánicas.

6.2 Análisis metalográfico

Las muestras para el análisis metalográfico fueron extraídas de la pista de frenado del disco, (figura 24), se utilizó la norma ASTM A247 presente en el ANEXO D, la cual especifica el procedimiento adecuado. Así, se pudo observar la microestructura del material, a la cual se le realizó un proceso metalográfico con pulido tipo espejo para obtener mejores para mejores resultados en el microscopio; durante el proceso metalográfico, se realizaron las siguientes pasos:

Figura 26. Extracción de la probeta para el análisis metalográfico.



Fuente: elaboración propia.

6.3 Selección de las muestras

Para el proceso de muestreo en los frenos de disco, se debe realizar el siguiente procedimiento experimental:

1. **Equipo de corte con hoja abrasiva y lubricante.** Una vez obtenida la muestra es necesario seleccionarla y cortarla en forma determinada para lograr superficies planas con la menor deformación posible de la superficie. En general, para materiales blandos, como el caso de la fundición gris, se cortan con discos duros, un importante factor a tener en cuenta es la temperatura generada por el rozamiento en el corte, el cual se debe realizar con líquido lubricante y refrigerante a la vez; en caso de corte manual se estaría modificando la estructura original de la muestra. En este paso se utilizó la cortadora de precisión Pico155, marca Dace Technologies (figura 27), para este tipo de

material férreo se usa un disco de corte diamantado a una velocidad promedio de 500 rpm y un lubricante a base de agua.

Figura 27. Cortadora Pico155



Fuente: elaboración propia.

- Montaje, recubrimiento de la muestra.** La muestra se coloca en una prensa que por lo general es hidráulica, allí se le añade un polímero o baquelita. En este paso se utilizó el montaje de presión neumática TP-7001, marca *Dace Technologies*, se recubrió la muestra a base de resina fenólica (polímero) (ver figura 28), el proceso de esta máquina dura aproximadamente 8 minutos en los que se calienta hasta 200°C a una presión de 90 Psi, para que este se adhiera a la muestra se espera a que se enfríe la muestra mediante la programación de la máquina y luego se retira.

Figura 28. Montaje de presión TP-7001



Fuente: elaboración propia.

- Pulido, obtención de la superficie con acabado espejo.** Para eliminar el material de la superficie de la muestra se utilizan abrasivos, cada vez, con partículas más finas. En este paso se utilizó el pulidor automatizado Nano

2000T, marca Dace Technologies, se implementaron las lijas de carburo de silicio por tiempos según la norma ASTM A247 y las consideraciones del fabricante de la máquina, Como se puede ver en la Figura 29 y tabla 7.

Figura 29. Pulidor automatizado Nano 2000T



Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Proceso de pulido

Abrasivo / Superficie	Lubricante	Fuerza	Aceleración (Superior/Inferior)	Tiempo
Papel abrasivo 240	Agua	5-10 Lb	200 rpm/200 rpm	Hasta aplanar
Papel abrasivo 360				1 minuto
Papel abrasivo 600				1 minuto
Papel abrasivo 800				1 minuto
Papel abrasivo 1,200				1 minuto
Paño de pulir (GOLPAD) con diamante policristalino (DIAMANT)	Lubricante púrpura (DIALUBE)	5-10 Lb	200 rpm/200 rpm	2 minutos
Paño de pulir (TRICOTEMICROPAD) con alúmina 0.05 μm		5-10 Lb	100 rpm/100 rpm	1 minuto

Fuente: García-León, R. A., Flórez-Solano, E., & Acevedo-Peñaloza, C. (2018).

Análisis termodinámico en frenos de disco. Bogotá, Colombia: ECOE Ediciones; Vander Voort, (2004).

Luego, se montan cada una de las lijas en la máquina, cumpliendo los tiempos establecidos en la **tabla 8** para obtener la superficie con acabado espejo que es ideal para observar en el microscopio la estructura del material.

4. **Grabados de acero al carbono, ataque químico.** Todo material distorsionado, resultante de los pasos de la preparación, debe ser completamente removido de la superficie antes de observar la muestra **bajo** el microscopio. El ataque se realizó aplicándole una gota de solución ácida, la cual ataca la superficie a una velocidad que varía con la orientación cristalina de la misma. Por lo **usual**, como los cristales de un metal tienen distintas orientaciones, los cristales adyacentes se disuelven por la solución de ataque a diferentes profundidades, produciendo así el efecto de altiplano.

Después del ataque, las interacciones de los límites de granos atacados en la superficie, quedan marcados por una red de escarpaduras poco profundas. Estas superficies, casi verticales, no reflejan la luz en la lente de los objetivos del microscopio en la misma forma que las superficies horizontales y las formas de los cristales que quedan entre ellos, como resultado, se observa la posición de los límites de los cristales. **Se** utilizó Nital al 2%, el cual está compuesto de 2 ml de ácido nítrico y 98 ml de alcohol etílico, con un tiempo de exposición en las muestras de 1 minuto aproximadamente un minuto, (ver figura 30).

Figura 30. Muestras atacadas con Nital al 2%



Fuente: Elaboración propia.

5. **Análisis metalográfico, imágenes de las muestras.** Este último paso fue realizado en un microscopio óptico de marca Optiks con una magnificación de 600X, (ver figura 31), mediante el cual, gracias a la cámara y el software que posee, se **obtienen** las imágenes de la metalografía o microestructura de las muestras analizadas a diferentes acercamientos para cada una de las muestras a las que se les realizó el debido proceso.

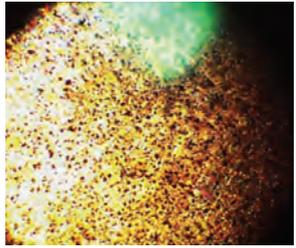
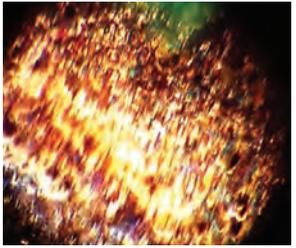
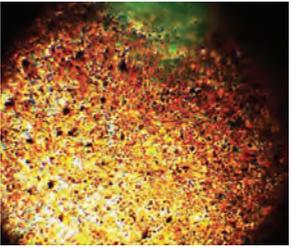
Figura 31. Microscopio óptico marca Optiks

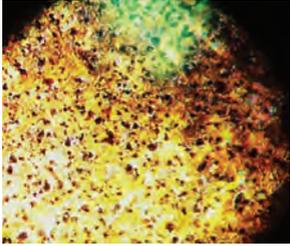
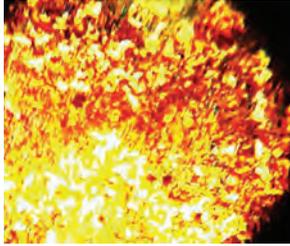
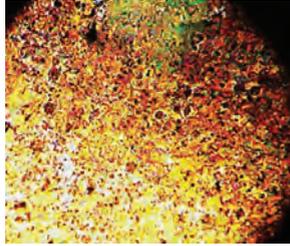
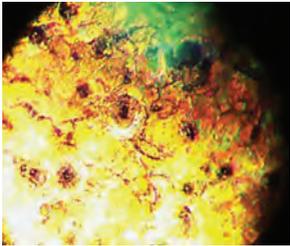
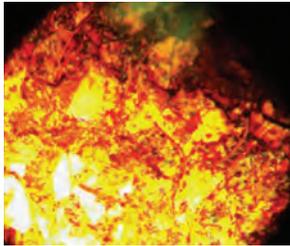
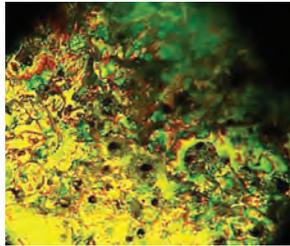
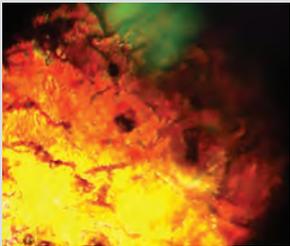
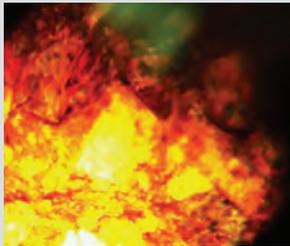
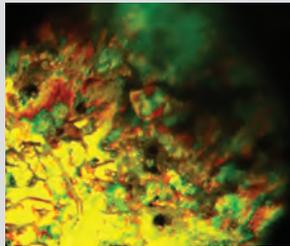
Fuente: Elaboración propia.

Las muestras metalográficas fueron analizadas con la finalidad de obtener las características principales de las fundiciones grises, ya sea la de los grafitos o de las fases presentes (ferrita y perlita). En caso del grafito, ya sea del tipo, las fases o su distribución.

De esta manera, se observaron las 3 muestras en los 4 oculares del microscopio a diferentes distancias de acercamiento y se obtuvieron las siguientes imágenes: las siguientes imágenes presentes en la tabla 8.

Tabla 8. Resultados obtenidos en el microscopio

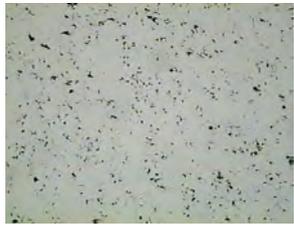
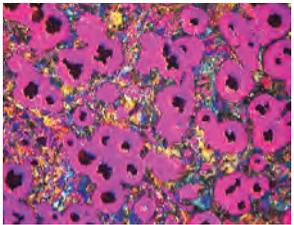
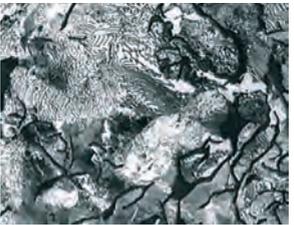
Muestras en el microscopio		
Disco 1	Disco 2	Disco 3
Con un acercamiento a 50X		
		

Muestras en el microscopio		
Disco 1	Disco 2	Disco 3
Con un acercamiento a 100X		
		
Con un acercamiento a 400X		
		
Con un acercamiento a 600X		
		

Fuente: Elaboración propia.

Se tomó como referencia el catálogo de “Metallographics Handbook”, el cual especifica para los hierros de fundición gris las siguientes características de la microestructura del material como se muestra en la siguiente tabla 9:

Tabla 9. Características metalográficas de la fundición gris

Fundición gris		
Acercado a 50X	Acercado a 400X	Acercado a 600X
		

Fuente: (Vander Voort, 2004)

De las imágenes analizadas y tomadas en el microscopio se observaron sus características y se determinó que pertenece a una fundición gris perlítica. Su estructura está formada de nódulos con inclusiones de grafito laminar (tabla 25), visto en un acercamiento a 600X, por otro lado, el grafito se ve en forma de vetas pequeñas. Como se sabe, la perlita contiene un 0.8% de carbono, por consiguiente, esta unidad de carbono se encuentra en la fundición perlítica gris en estado ligado, es decir, en forma de cementita. La cantidad restante se encuentra en estado libre, o sea, en forma de grafito; de esta manera, por la geometría en las muestras de fundición gris ordinaria el grafito toma la forma de vetas pequeñas, este grafito se llama laminar. En la Figura de fundición gris a 600X se muestra la estructura de una fundición ferrítica, donde el carbono se encuentra en estado libre, formando vetas de grafito en forma de láminas.

Debido a la estructura de las muestras analizadas es un grafito tipo C, cuando una fundición tiene composición hipereutéctica $\%C + \%Si/3 + \%P/3$, es superior a 4.25%, y la solidificación comienza con la formación de grafito primario en el intervalo entre la temperatura del líquido y la temperatura eutéctica. Este grafito se desarrolla libremente en el interior del líquido, sin obstáculos de crecimiento, a la vez que proporciona láminas rectas cuyo espesor supera al que presentará el grafito eutéctico cuando llegue a formarse. Este grafito tipo C posee resistencia al choque térmico, pero débil resistencia a la tracción.

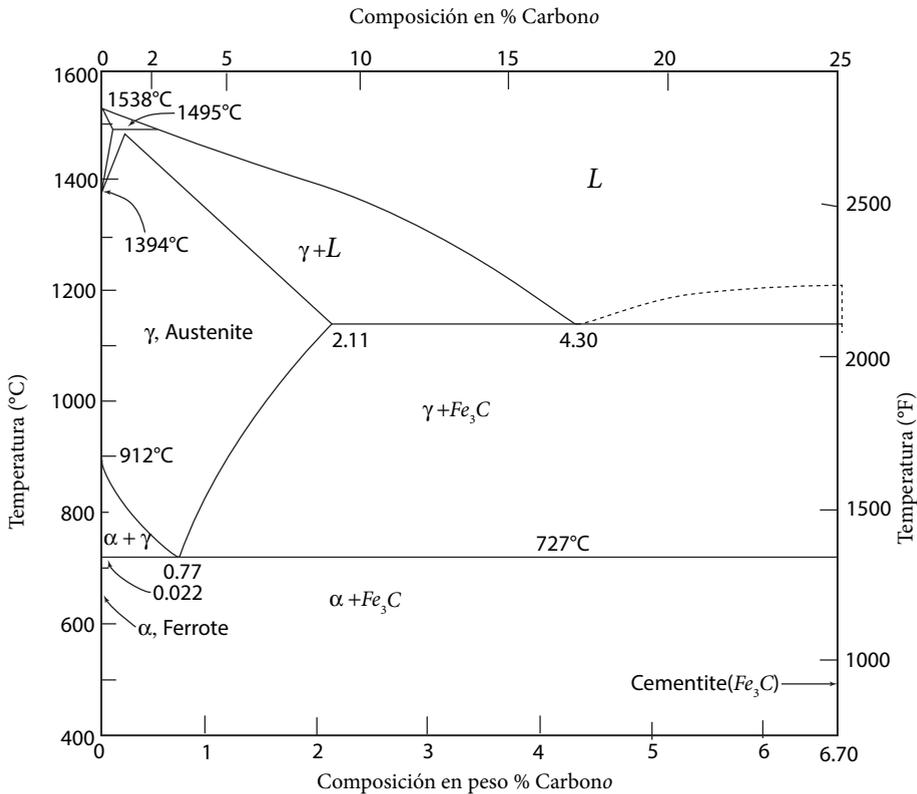
Es interesante señalar que en la práctica es muy difícil encontrar fundiciones en las que todo el carbono aparezca en forma de grafito, tal como se acaba de indicar. Sin embargo, se hace referencia a esta clase de fundición, que casi puede considerarse teórica, porque se considero que señalándola se facilita el estudio de las demás. Las fundiciones de este grupo reciben el nombre de fundiciones grises ferríticas, en ellas, todo el carbono se encuentra en forma de grafito.

Por lo general, la fundición con grafito nodular se llama fundición maleable. A su vez, la fundición laminar se llama fundición gris ordinaria, y la fundición con grafito esferoidal, fundición de alta resistencia.

Diagrama de hierro carbono. En la Figura 32 se muestran las fases de las aleaciones Fe - C. Las líneas continuas determinan la temperatura de las fases de equilibrio de la austenita, la ferrita, la cementita y las líneas discontinuas; la fase de equilibrio entre la austenita, la ferrita y el grafito.

Los contenidos en carbono de las aleaciones eutécticas y eutectoides del diagrama estable varían con el contenido en silicio de las fundiciones y son inferiores a los correspondientes al diagrama meta-estable. En las transformaciones del diagrama estable para una temperatura determinada, la austenita es capaz de disolver menor cantidad de carbono que el que disuelve a la misma temperatura cuando las transformaciones se hacen de acuerdo con el diagrama meta-estable.

Figura 32. Diagrama de Hierro - Carbono



Fuente: (Vander Voort, 2004)

6.4 Características estructurales

La resistencia a compresión de las fundiciones grises es alta, es 3 o 4 veces superior a la resistencia a la tracción. Este efecto se debe a que, en compresión, apenas influye el efecto de las láminas del grafito, por lo tanto su contribución negativa se reduce simplemente a disminuir la composición eficaz de la matriz metálica.

La compresión es una presión que tiende a causar una reducción del volumen cuando se somete un material a una fuerza de flexión, cizalladura o torsión; en ella actúan de manera simultánea fuerzas de tensión y de compresión. En el caso de la plasto-deformación, que es una deformación permanente y gradual causada por una fuerza continuada sobre un material, los materiales sometidos a altas temperaturas son especialmente vulnerables a esta plasto-deformación.

De esta manera aparece la fatiga, definida como una fractura progresiva, se produce cuando una pieza mecánica está sometida a un esfuerzo repetido o cíclico, por ejemplo, una vibración. Aunque el esfuerzo máximo nunca supere el límite elástico, el material puede romperse incluso después de poco tiempo. En algunos metales, como las aleaciones de titanio, puede evitarse la fatiga manteniendo la fuerza cíclica por debajo de un nivel determinado. En la fatiga no se observa ninguna deformación aparente, pero se desarrollan pequeñas grietas localizadas que se propagan por el material hasta que la superficie eficaz que queda no aguanta el esfuerzo máximo de la fuerza cíclica.

El conocimiento del esfuerzo de tensión, los límites elásticos y la resistencia de los materiales a la plasto-deformación y a la fatiga, son extremadamente importantes en ingeniería. Estos se definen a continuación:

Límite de elasticidad: el valor aproximado de la fuerza se determina por el punto donde comienza la divergencia entre la curva de compresión y la continuación en línea recta, se considera su valor la desviación de la dependencia lineal entre la carga y el alargamiento del 50%.

Límite de fluencia: se calcula este límite, que es el esfuerzo con el cual el acortamiento residual alcanza una magnitud generalmente del 0.2%. Esta fluencia se designa con la letra sigma.

Límite de resistencia: puede ser determinado solo si ocurre una fractura, caso en que esta magnitud se calcula a partir de la fuerza máxima.

El ensayo de compresión fue realizado en la prensa universal Modelo 50 K, marca Pinzuar Ltda., la cual posee una capacidad de 1,000 KN (figura 33), la máquina está programada de acuerdo a las dimensiones de cada una de las muestras y, una vez iniciado el ensayo, el software toma las lecturas de la prueba cada 0.06 segundos, dada la velocidad programada, que para este caso fue de 6 mm/min.

Figura 33. Prensa universal Modelo 50 K



Fuente: Elaboración propia.

Las probetas o muestras para los ensayos de compresión de materiales metálicos fueron extraídas de la pista de disco (figura 34), tomando como referencia la norma ASTM E9-89a, presente en el ANEXO E, donde se especifica cada uno de los procedimientos y las dimensiones de las probetas. En la realización se tuvieron en cuenta las muestras extraídas, directamente de la pista de frenado, 2 muestras de cada uno de los discos, debido a que esta parte del disco es donde el material experimenta los mayores esfuerzos por fricción y cambios de temperatura. Una de las características principales, es que los extremos deben ser planos para no causar concentraciones de esfuerzos y deben ser perpendiculares al eje de la pieza y del mismo espesor, para no causar flexión debida a carga excéntrica.

Figura 34. Extracción de las probetas de compresión

Fuente: Elaboración propia.

Luego de la extracción de las probetas según la norma, se procede a la medición de las mismas con un calibrador pie de rey. Así, se obtuvieron las siguientes medidas:

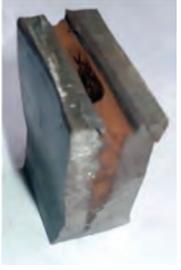
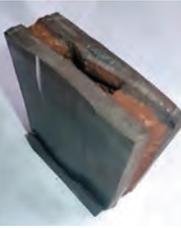
Tabla 10. Dimensiones de la probeta al inicio del ensayo

Probeta	Dimensiones en milímetros		
	A	B	C
Disco 1	30.5	15.8	46.5
Disco porción 1	9	6.5	47
Disco 2	25	19.5	50.7
Disco porción 2	9	5.2	52
Disco 3	48.8	19.6	54.8
Disco porción 3	13	6.5	53

Fuente: Elaboración propia.

Después de tener las probetas, se procede a realizar el montaje en la máquina universal y aplicarle las respectivas **cargas** para la realización del ensayo. De esta manera, se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la tabla 11:

Tabla 11. Ensayo de compresión

Ensayo maquina universal			
Disco 1		Disco porción 1	
	Carga máxima aplicada 329.96 kN		Carga máxima aplicada 25.28 kN
Disco 2		Disco porción 2	
	Carga máxima aplicada 262.97 kN		Carga máxima aplicada 20.08 kN
Disco 3		Disco porción 3	
	Carga máxima aplicada 170.49 kN		Carga máxima aplicada 16.20 kN

Fuente: Elaboración propia.

En lo que respecta a los resultados de las cargas **aplicadas progresivamente**, a la gráfica esfuerzo-deformación, que arrojó el software de la maquina universal, **donde** se especifica la resistencia real y la carga máxima que, además, pone en evidencia cada una de las zonas (elástica, plástica), y el punto de fractura; aplicadas en cada una de las probetas, se pueden observar en los ANEXOS F, G, H, I, J y K.

En consecuencia de la aplicación de las cargas a las probetas en la maquina universal, se procede a la medición con el calibrador pie de rey, donde se obtuvieron las siguientes medidas:

Tabla 12. Dimensiones de la probeta después del ensayo

Probeta	Dimensiones en milímetros		
	a	b	c
Disco 1	33.5	16.4	44.5
Disco porción 1	9.5	7	45
Disco 2	26	20	48.7
Disco porción 2	9.5	4.9	50
Disco 3	50.8	20	50.8
Disco porción 3	13.5	7	52

Fuente: Elaboración propia.

En conclusión, el ensayo de compresión es una prueba relativamente sencilla que nos permite medir la última carga a la que una probeta está sometida por una carga de compresión hasta que falla. Sin embargo, es muy importante tener en cuenta las simplificaciones que este ensayo supone, por las cuales no es un método exacto, sino más bien aproximado; a pesar de esto es muy solicitado, debido a que la sencillez de su método y el equipo que utiliza permiten bajos costos en relación a otros relacionados. En este ensayo se trabaja manteniendo la deformación constante, siendo la carga aplicada o resistida lo que varía y produce la forma de la curva esfuerzo-deformación.

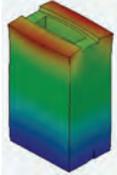
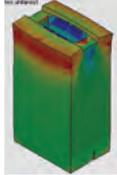
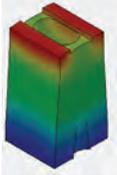
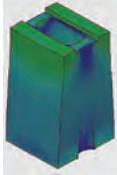
Método de diferencias finitas. Mediante este método es posible obtener una solución aproximada de las ecuaciones diferenciales definidas en un recinto o una región de trabajo. Sobre dicho recinto habrá unas condiciones de contorno o frontera y unas condiciones iniciales que marcarán el punto de partida en la solución de problemas concretos.

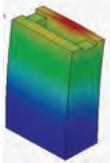
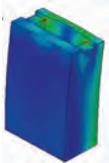
Método de elemento finito (FEM). Hoy en día está es una herramienta poderosa en la solución numérica de un amplio rango de problemas de ingeniería. Son muchas sus aplicaciones, las cuales van desde el análisis por deformación y esfuerzos en automóviles, aeronaves, edificios y estructuras, hasta el análisis de los campos del flujo de calor, de fluidos, magnético, filtraciones y diversos problemas de flujo. Con el avance de la tecnología en computadores y sistemas CAD, pueden modelarse problemas complejos con mucha facilidad, dado que el computador permite probar varias configuraciones alternas antes de construir el prototipo. Esto sugiere modernizarse empleando diversos desarrollos para entender la teoría básica, los aspectos computacionales del método de elementos finitos y las técnicas

de modelado. En este método de análisis, una región compleja que define un continuo se discretiza en formas geométricas simples llamadas elementos finitos. Las propiedades del material y las relaciones gobernantes son consideradas sobre esos elementos y expresadas en términos de valores desconocidos en los nodos del elemento. El proceso de ensamble, cuando se consideran debidamente las cargas y restricciones, produce un conjunto de ecuaciones que dan una solución aproximada al fenómeno que se está presentado.

En lo que respecta al software *SolidWorks*, se simuló el efecto de la última carga aplicada por la máquina universal sobre cada una de las muestras sin el efecto de desgaste generado por la corrosión, allí se observó que las pérdidas en las propiedades físico-mecánicas del material se ven bruscamente afectadas. Como se puede ver en la tabla 13, en el ensayo realizado en la máquina universal, a las muestras se le observan grietas y partiduras debido a el efecto de los cambios térmicos en el material y las variables ambientales del medio. Por otra parte, en las últimas cargas aplicadas a las muestras de los discos y a las porciones, se observó que debido al material mantienen una carga nominal, dependiendo de la sección y el área de la muestra a la que se le realizó el ensayo.

Tabla 13. Simulación del ensayo de compresión mediante *SolidWorks*

Ensayo de compresión			
Ensayo maquina universal	<i>SolidWorks</i>		
	Desplazamiento estático	Tensión de Von Mises	Deformación unitaria
Muestra Disco 1			
			
Muestra Disco 2			
			

Ensayo de compresión			
Ensayo maquina universal	SolidWorks		
	Desplazamiento estático	Tensión de Von Mises	Deformación unitaria
Muestra Disco 3			
			
Concentración del esfuerzo			

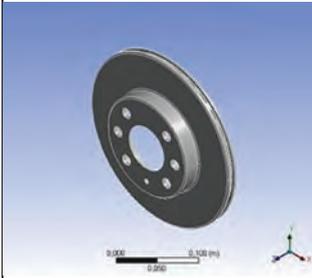
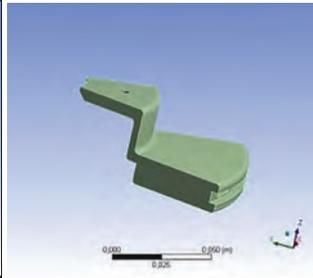
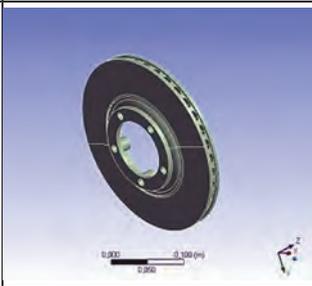
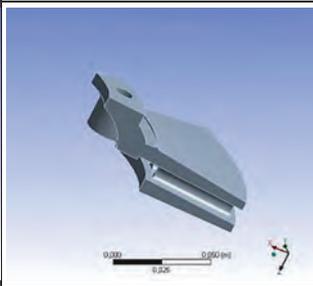
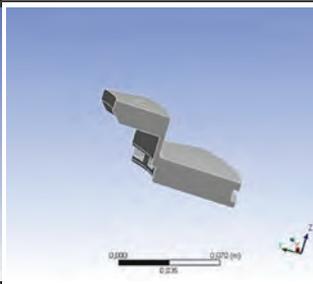
Fuente: Elaboración propia.

6.5 Análisis estructural estático por *solidworks*

El análisis estático del sistema de freno se realizó a partir del cálculo de las partículas sin movimiento para determinar condiciones de esfuerzo, deformaciones y factor de seguridad, a las cuales están sometidos estos discos.

La geometría y los planos de los discos se realizaron mediante el software *SolidWorks* presentes en los ANEXOS L, M, N, O, P y Q, los cuales fueron importados al software Ansys Inc., para realizar el respectivo procedimiento y análisis estructural estático.

Tabla 14. Geometría de los discos

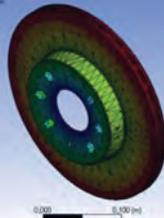
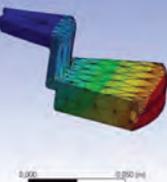
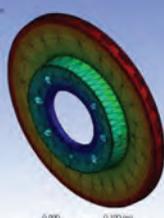
#	Disco	Porción
Deformación total		
		
		

Fuente: Elaboración propia.

Mediante la realización de este análisis estático a los tres discos se puede observar, con una visión más amplia, el comportamiento de los esfuerzos, las deformaciones y el factor de seguridad de los discos en la distribución de toda su geometría, además de los valores máximos y mínimos de cada uno, lo que es de gran interés en la investigación.

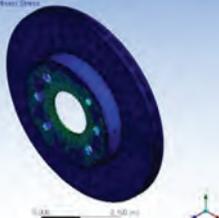
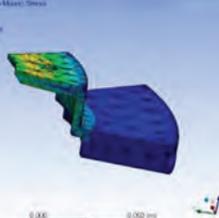
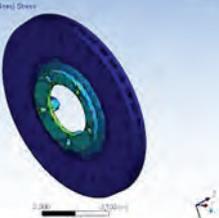
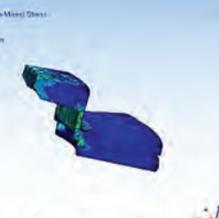
A su vez, en la tabla 15 se observa la simulación de los tres discos, donde las deformaciones más grandes, de cada uno de ellos, evidencian en sus extremos que son milimétricas; a causa del desgaste generado por el área de contacto con las pastillas del sistema de frenado.

Tabla 15. Deformaciones totales en los discos

Deformación total	#	Disco	Porción	
	D.1	<p>A: Static Structural Figu. 1 Type: Total Deformation Unit: m Time: 1 12/03/2014 02:27 p.m.</p> 	<p>ANSYS A: Static Structural Figu. 1 Type: Total Deformation Unit: m Time: 1 12/03/2014 02:29 p.m.</p> 	
		D.2	<p>A: Static Structural Figu. 1 Type: Total Deformation Unit: m Time: 1 02/03/2014 10:23 p.m.</p> 	<p>ANSYS A: Static Structural Figu. 1 Type: Total Deformation Unit: m Time: 1 02/03/2014 01:10 p.m.</p> 
			D.3	<p>A: Static Structural Figu. 1 Type: Total Deformation Unit: m Time: 1 02/03/2014 06:30 p.m.</p> 

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Tensiones de Von Mises para los discos

Tensión de Von Mises	#	Disco	Porción
	D.1	<p>A: Static Structural Figure Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: Pa Time: 1 08/02/2014 00:27 p.m.</p>  <p>4.254e6 Max 3.501e6 2.2054e6 2.0207e6 2.3023e6 1.8024e6 1.4116e6 8.11e7 4.5552e7 5077 Min</p>	<p>A: Static Structural Figure Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: Pa Time: 1 02/02/2014 02:21 p.m.</p>  <p>1.8862e7 Max 1.6917e7 1.4671e7 1.2675e7 1.048e7 8.3043e6 6.2087e6 4.1931e6 2.0205e6 1061.7 Min</p>
	D.2	<p>A: Static Structural Figure Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: Pa Time: 1 22/02/2014 10:29 p.m.</p>  <p>5.4162e6 Max 4.6172e6 4.2115e6 3.8122e6 3.0009e6 2.2075e6 1.3822e6 1.2069e6 6.2066e5 2.2093e5 Min</p>	<p>A: Static Structural Figure Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: Pa Time: 1 08/04/2014 01:33 p.m.</p>  <p>6.0917e6 Max 5.2889e6 4.3002e6 3.5024e6 3.3103e6 2.5382e6 2.0023e6 1.3781e6 1.0389e6 2087 Min</p>
	D.3	<p>A: Static Structural Figure Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: Pa Time: 1 08/04/2014 12:03 p.m.</p>  <p>4.536e6 Max 4.0149e6 3.5229e6 3.0113e6 2.5007e6 2.0081e6 1.5385e6 1.0645e6 6.3332e5 5.274e5 Min</p>	<p>A: Static Structural Figure Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: Pa Time: 1 02/02/2014 02:01 p.m.</p>  <p>2.406e7 Max 2.1417e7 1.9322e7 1.6905e7 1.3262e7 1.0717e7 8.2345e6 6.3055e6 2.6062e6 1463.8 Min</p>

Fuente: Elaboración propia.

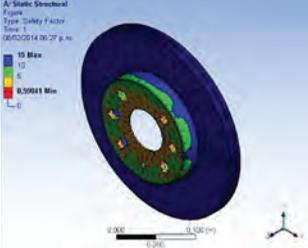
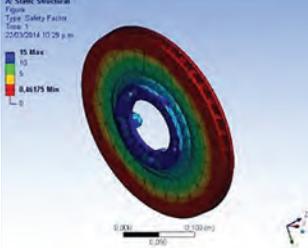
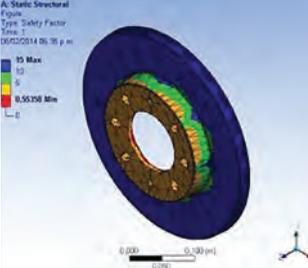
Tabla 17. Deformaciones elásticas en los discos

Deformación elástica	#	Disco	Porción
	D.1		
	D.2		
	D.3		

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte el esfuerzo de von Mises y el estrés elástico (ver tabla 17 y 18), resultan ser mínimos y milimétricos sobre el área de contacto con las pastillas del sistema de frenado, de tal manera se produce la uniformidad de área en esta parte del disco.

Tabla 18. Factor de seguridad en los discos

	#	Disco
Factor de seguridad	D.1	
	D.2	
	D.3	

Fuente: Elaboración propia.

Además en el análisis de resultados, el factor de seguridad se hace máximo en el mismo punto en las deformaciones y tensiones obtenidas anteriormente y mínimo en la campana donde está sujeto al eje, efecto que produce que el sistema de frenado sea óptimo en lo que respecta a la seguridad operacional.

BIBLIOGRAFÍA



- Ashby, M. y Jones, D. (2008). *Materiales para ingeniería. Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño*. México: Reverte S.A.
- ASTM. (s.f.). *ASTM*. Recuperado de <http://www.astm.org/>
- Bilurbina, L., Liesa, F. y Iribarren, F. (1996). *Fundamentos de corrosión y métodos de protección*. Barcelona: UPC.
- Criado, E. (2012). *Diseño y cálculo del sistema de frenado para un prototipo formula student*. (Tesis de pregrado). Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España.
- García-León, R. A. (2017). *Thermal study in three vented brake discs, using the finite element analysis*. DYNA (Colombia), 84(200), 19–27. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n200.55663>
- García-León, R. A., & Flórez-Solano, E. (2017). *Dynamic analysis of three autoventilated disc brakes*. Ingeniería E Investigación, 37(3), 102–114. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v37n3.63381>
- García-León, R. A., Flórez-Solano, E., & Acevedo-Peñalosa, C. (2018). *Análisis termodinámico en frenos de disco*. Bogota, Colombia: ECOE Ediciones.
- García-León, R. A., Flórez-Solano, E., & Rodríguez-Castilla, M. M. (2019). *Thermo-mechanical assessment in three auto-ventilated disc brake by implementing finite elements*. Journal of Physics: Conference Series, 11, 1129. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1129>
- García-León, R. A., & Perez Rojas, E. (2017). *Analysis of the amount of heat flow between cooling channels in three vented brake discs*. Ingeniería Y Universidad, 21(1), 55–70. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu21-1.aahf>
- García-León, R., Flórez-Solano, E., & Suárez-Quiñones, Á. (2019). *Brake Discs: a Technological Review From Its Analysis and Assessment*. Informador Técnico, 83(2), 217–234. <https://doi.org/10.23850/22565035.1766>
- Goldin, J. (1998). *Curso básico de corrosión*. Venezuela: Centro Internacional de Entrenamiento y Desarrollo (CIED).
- Pero, J. (2000). *Aceros: metalurgia física, selección y diseño*. Madrid: Editoriales Dossat.

Puhn, F. (2000). *Brake HandBook*. USA: HP Books.

Roadhouse. (2013). *Manual técnico de la pastilla de freno (Discos de frenos)*.
Recuperado de <http://www.imporbrake.com/manuales/Cap3.pdf>

Uhlig's, H. *Corrosion Handbook*. Londres: R. Winston Revie.

Vander Voort, G. (2004). ASM Handbook. Volume 9 - *Metallography and Microstructures* (ASM Intern). USA.

ANEXOS

ANEXO A

Norma ASTM 370

A 370 - 03a

TABLE 3 Approximate Hardness Conversion Numbers for Non-austenitic Steels^A (Rockwell B to Other Hardness Numbers)

Rockwell B Scale, 100-kgf Load $\frac{1}{16}$ -in. (1.588-mm) Ball	Vickers Hardness Number	Brinell Hardness, 3000-kgf Load, 10-mm Ball	Knoop Hardness, 500-gf Load and Curvature	Rockwell A Scale, 80-kgf Load, Diamond Penetrator	Rockwell F Scale, 80-kgf Load, $\frac{1}{16}$ -in. (1.588-mm) Ball	Rockwell Superficial Hardness			Approximate Tensile Strength (MPa)
						15T Scale, 15-kgf Load, $\frac{1}{16}$ -in. (1.588-mm) Ball	30T Scale, 30-kgf Load, $\frac{1}{16}$ -in. (1.588-mm) Ball	45T Scale, 45-kgf Load, $\frac{1}{16}$ -in. (1.588-mm) Ball	
100	240	240	251	61.5	...	93.1	83.1	72.0	110 (800)
99	234	234	240	60.9	...	92.8	82.5	71.0	114 (785)
98	228	228	231	60.2	...	92.6	81.8	70.9	100 (750)
97	222	222	230	59.5	...	92.1	81.1	69.9	104 (745)
96	216	216	231	58.9	...	91.8	80.4	68.9	102 (705)
95	210	210	226	58.3	...	91.5	79.8	67.0	100 (690)
94	205	205	221	57.6	...	91.2	79.1	66.0	98 (675)
93	200	200	216	57.0	...	90.8	78.4	65.0	94 (650)
92	195	195	211	56.4	...	90.5	77.8	64.8	92 (635)
91	190	190	206	55.8	...	90.2	77.1	63.8	90 (620)
90	185	185	201	55.2	...	89.9	76.4	62.8	89 (615)
89	180	180	196	54.6	...	89.5	75.8	61.8	88 (600)
88	176	176	192	54.0	...	89.2	75.1	60.8	86 (590)
87	172	172	188	53.4	...	88.9	74.4	59.8	84 (580)
86	169	169	184	52.8	...	88.6	73.8	58.8	83 (570)
85	165	165	180	52.3	...	88.2	73.1	57.8	82 (565)
84	162	162	176	51.7	...	87.9	72.4	56.8	81 (560)
83	159	159	173	51.1	...	87.6	71.8	55.8	80 (550)
82	156	156	170	50.6	...	87.3	71.1	54.8	77 (530)
81	153	153	167	50.0	...	86.9	70.4	53.8	73 (505)
80	150	150	164	49.5	...	86.6	69.7	52.8	72 (495)
79	147	147	161	48.9	...	86.3	69.1	51.8	70 (485)
78	144	144	158	48.4	...	86.0	68.4	50.8	69 (475)
77	141	141	155	47.9	...	85.6	67.7	49.8	68 (470)
76	139	139	152	47.3	...	85.3	67.1	48.8	67 (460)
75	137	137	150	46.8	99.6	85.0	66.4	47.8	66 (455)
74	135	135	147	46.3	99.1	84.7	65.7	46.8	65 (450)
73	132	132	145	45.8	98.5	84.3	65.1	45.8	64 (440)
72	130	130	143	45.3	98.0	84.0	64.4	44.8	63 (435)
71	127	127	141	44.8	97.4	83.7	63.7	43.8	62 (425)
70	125	125	139	44.3	96.8	83.4	63.1	42.8	61 (420)
69	123	123	137	43.8	96.2	83.0	62.4	41.8	60 (415)
68	121	121	135	43.3	95.6	82.7	61.7	40.8	59 (405)
67	119	119	133	42.8	95.1	82.4	61.0	39.8	58 (400)
66	117	117	131	42.3	94.5	82.1	60.4	38.7	57 (395)
65	115	115	129	41.8	93.9	81.8	59.7	37.7	56 (385)
64	114	114	127	41.4	93.4	81.4	59.0	36.7	...
63	112	112	125	40.9	92.8	81.1	58.4	35.7	...
62	110	110	124	40.4	92.2	80.8	57.7	34.7	...
61	108	108	122	40.0	91.7	80.5	57.0	33.7	...
60	107	107	120	39.5	91.1	80.1	56.4	32.7	...
59	106	106	118	39.0	90.5	79.8	55.7	31.7	...
58	104	104	117	38.6	90.0	79.5	55.0	30.7	...
57	103	103	115	38.1	89.4	79.2	54.4	29.7	...
56	101	101	114	37.7	88.8	78.9	53.7	28.7	...
55	100	100	112	37.2	88.2	78.5	53.0	27.7	...

ANEXO B

Norma ASTM E18



Designation: A 247 – 67 (Reapproved 1998)

Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings¹

This standard is issued under the fixed designation A 247; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript (e) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method covers the classification of graphite in cast irons in terms of type, distribution, and size. This test method is intended to be applicable for all iron-carbon alloys containing graphite particles, and may be applied to gray irons, malleable irons, and the ductile (nodular) irons.

1.2 The reference standards included in this test method are in no way to be construed as specifications. In an appropriate specification for a specific material where graphite microstructure is an important consideration this test method may be used as a reference to define concisely the graphite microstructure required.

1.3 These standards are offered primarily to permit accurate reporting of microstructures of cast irons and to facilitate the comparison of reports by different laboratories or investigators.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety problems associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to consult and establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

- 2.1 *ASTM Standards:*
E.3 Methods of Preparation of Metallographic Specimens²

3. Summary of Test Method

3.1 The reference diagrams included in this standard form the basis for classification. Characteristic features of graphite particles are designated by numerals and letters. Type, distribution, and size of observed graphite are compared with the idealized microstructures in the standard charts and rated accordingly as closely as possible to the equal or similar microstructures in the charts.

4. Significance and Use

4.1 The comparison of observed graphite particles with the structures shown in the charts give only purely descriptive information on the type, distribution, and size of the graphite in the sample being evaluated. It does not indicate except in a

very broad way the origin of the graphite, or the suitability of the iron-carbon alloy for a particular service.

5. Test Specimens or Samples

5.1 The preferred sample is a section cut from an actual casting that is being evaluated. When this is impractical, a test lug or projection often can be cast attached to the casting and sawed or broken off to be used as the sample. If neither of these methods is convenient, microscopical test coupons, such as that recommended by the Ductile Iron Research Committee (12K) of the American Foundrymen's Society³ should be cast from metal representative of the castings poured.

6. Polishing

6.1 Grinding and polishing may follow the usual accepted metallographic procedures as covered in Methods E 3, except that care must be taken that the graphite is retained at the polished surface and not torn or dragged out. Use of diamond powder polishing compound in one of the final stages of polishing is very effective in retaining the graphite at the polished surface.

7. Classification of Graphite Form with Chart

7.1 The graphite form type chart (Plate I)⁴ is used as a reference standard by scanning the polished specimen under the microscope and noting the graphite forms in the microstructure that more nearly correspond to type designations on the chart.

7.2 Type I is the normal and usually desirable graphite form in ductile iron, although the presence of Type II graphite forms has little or no adverse effect on properties. Graphite forms represented by Types IV through VI often occur in ductile iron in conjunction with Types I and II. The percentages of each graphite type are estimated by observation, or better, by counting the particles of each type. Types present in a sample are to be reported in percentages to total 100. Any convenient magnification that clearly reveals the graphite form may be used.

7.3 Type III is the graphite form most often seen in malleable iron castings after annealing. Some malleable irons may contain Types I or II graphite particles also.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee A-4 on Iron Castings and is the direct responsibility of Subcommittee A4.21 on Testing. Current edition effective Aug. 25, 1997. Originally issued 1941. Replaces A 247 - 47.

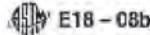
² Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

³ Transactions, American Foundrymen's Society, 1960, p. 625.

⁴ Plates I, II, and III may be obtained from ASTM Headquarters, Order ADEA0247.

ANEXO C

Continuación de la Norma ASTM E18



E18 - 08b

H152/B152M Specification for Copper Sheet, Strip, Plate, and Rolled Bar

B370 Specification for Copper Sheet and Strip for Building Construction

E29 Practice for Using Significant Digits in Test Data to Determine Conformance with Specifications

E92 Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials

E140 Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness

E384 Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials

E691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method

2.2 American Bearing Manufacturer Association Standard:

ABMA 10-1989 Metal Balls⁴

2.3 ISO Standards:

ISO 6508-1 Metallic Materials—Rockwell Hardness Test—Part 1: Test Method (scales A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)⁵

ISO/IEC 17011 Conformity Assessment—General Requirements for Accreditation Bodies Accrediting Conformity Assessment Bodies⁶

ISO/IEC 17025 General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories⁷

2.4 Society of Automotive Engineers (SAE) Standard:

SAE J417 Hardness Tests and Hardness Number Conversions⁸

Terminology and Equations

3.1 Definitions:

3.1.1 *calibration*—determination of the values of the significant parameters by comparison with values indicated by a reference instrument or by a set of reference standards.

3.1.2 *verification*—checking or testing to assure conformance with the specification.

3.1.3 *standardization*—to bring in conformance to a known standard through verification or calibration.

3.1.4 *Rockwell hardness test*—an indentation hardness testing a verified machine to force a diamond spheroidal indenter or tungsten carbide (or steel) ball indenter, under specified conditions, into the surface of the material under test, to measure the difference in depth of the indentation as the force on the indenter is increased from a specified preliminary force to a specified total test force and then returned to the preliminary test force.

3.1.5 *Rockwell superficial hardness test*—same as the Rockwell hardness test except that smaller preliminary and total test forces are used with a shorter depth scale.

3.1.6 *Rockwell hardness number*—a number derived from the net increase in the depth of indentation as the force on an indenter is increased from a specified preliminary test force to a specified total test force and then returned to the preliminary test force.

3.1.7 *Rockwell hardness machine*—a machine capable of performing a Rockwell hardness test and/or a Rockwell superficial hardness test and displaying the resulting Rockwell hardness number.

3.1.7.1 *Rockwell hardness testing machine*—a Rockwell hardness machine used for general testing purposes.

3.1.7.2 *Rockwell hardness standardizing machine*—a Rockwell hardness machine used for the standardization of Rockwell hardness indenters, and for the standardization of Rockwell hardness test blocks. The standardizing machine differs from a regular Rockwell hardness testing machine by having tighter tolerances on certain parameters.

3.2 Equations:

3.2.1 The average \bar{H} of a set of n hardness measurements H_1, H_2, \dots, H_n is calculated as:

$$\bar{H} = \frac{H_1 + H_2 + \dots + H_n}{n} \quad (1)$$

3.2.2 The error E in the performance of a Rockwell hardness machine at each hardness level, relative to a standardized scale, is determined as:

$$E = \bar{H} - H_{STD} \quad (2)$$

where:

\bar{H} = average of n hardness measurements H_1, H_2, \dots, H_n made on a standardized test block as part of a performance verification, and

H_{STD} = certified average hardness value of the standardized test block.

3.2.3 The *repeatability* R in the performance of a Rockwell hardness machine at each hardness level, under the particular verification conditions, is estimated by the range of n hardness measurements made on a standardized test block as part of a performance verification, defined as:

$$R = H_{max} - H_{min} \quad (3)$$

where:

H_{max} = highest hardness value, and

H_{min} = lowest hardness value.

4. Significance and Use

4.1 The Rockwell hardness test is an empirical indentation hardness test that can provide useful information about metallic materials. This information may correlate to tensile strength, wear resistance, ductility, and other physical characteristics of metallic materials, and may be useful in quality control and selection of materials.

4.2 Rockwell hardness tests are considered satisfactory for acceptance testing of commercial shipments, and have been used extensively in industry for this purpose.

4.3 Rockwell hardness testing at a specific location on a part may not represent the physical characteristics of the whole part or end product.

⁴ Available from American Bearing Manufacturers Association (ABMA), 2025 Strain, NW, Suite 800, Washington, DC 20036.

⁵ Available from American National Standards Institute (ANSI), 25 W 43rd St., Floor, New York, NY 10036, <http://www.ansi.org>.

⁶ Available from Society of Automotive Engineers (SAE), 400 Commonwealth, Warrendale, PA 15090-0001, <http://www.sae.org>.

ANEXO D

Norma ASTM A247



Designation: A 247 – 67 (Reapproved 1998)

Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings¹

This standard is issued under the fixed designation A 247; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscripted epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or approval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method covers the classification of graphite in cast irons in terms of type, distribution, and size. This test method is intended to be applicable for all iron-carbon alloys containing graphite particles, and may be applied to gray irons, malleable irons, and the ductile (nodular) irons.

1.2 The reference standards included in this test method are in no way to be construed as specifications. In an appropriate specification for a specific material where graphite microstructure is an important consideration this test method may be used as a reference to define concisely the graphite microstructure required.

1.3 These standards are offered primarily to permit accurate reporting of microstructures of cast irons and to facilitate the comparison of reports by different laboratories or investigators.

1.4 This standard does not purport to address all of the safety problems associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to consult and establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

2. Referenced Documents

- 2.1 *ASTM Standards*:
E 3 Methods of Preparation of Metallographic Specimens²

3. Summary of Test Method

3.1 The reference diagrams included in this standard form the basis for classification. Characteristic features of graphite particles are designated by numerals and letters. Type, distribution, and size of observed graphite are compared with the idealized microstructures in the standard charts and rated accordingly as closely as possible to the equal or similar microstructures in the charts.

4. Significance and Use

4.1 The comparison of observed graphite particles with the structures shown in the charts give only purely descriptive information on the type, distribution, and size of the graphite in the sample being evaluated. It does not indicate except in a

very broad way the origin of the graphite, or the suitability of the iron-carbon alloy for a particular service.

5. Test Specimens or Samples

5.1 The preferred sample is a section cut from an actual casting that is being evaluated. When this is impractical, a test lug or projection often can be cast attached to the casting and sawed or broken off to be used as the sample. If neither of these methods is convenient, microscopical test coupons, such as that recommended by the Ductile Iron Research Committee (12K) of the American Foundrymen's Society³ should be cast from metal representative of the castings poured.

6. Polishing

6.1 Grinding and polishing may follow the usual accepted metallographic procedures as covered in Methods E 3, except that care must be taken that the graphite is retained at the polished surface and not torn or dragged out. Use of diamond powder polishing compound in one of the final stages of polishing is very effective in retaining the graphite at the polished surface.

7. Classification of Graphite Form with Chart

7.1 The graphite form type chart (Plate I)⁴ is used as a reference standard by scanning the polished specimen under the microscope and noting the graphite forms in the microstructure that more nearly correspond to type designations on the chart.

7.2 Type I is the normal and usually desirable graphite form in ductile iron, although the presence of Type II graphite forms has little or no adverse effect on properties. Graphite forms represented by Types IV through VI often occur in ductile iron in conjunction with Types I and II. The percentages of each graphite type are estimated by observation, or better, by counting the particles of each type. Types present in a sample are to be reported in percentages to total 100. Any convenient magnification that clearly reveals the graphite form may be used.

7.3 Type III is the graphite form most often seen in malleable iron castings after annealing. Some malleable irons may contain Types I or II graphite particles also.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee A-4 on Iron Castings, and is the direct responsibility of Subcommittee A04.21 on Testing.

Current edition effective Aug. 25, 1997. Originally issued 1941. Replaces A 247 - 47.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01.

³ Transactions, American Foundrymen's Society, 1960, p. 655.

⁴ Plates I, II, and III may be obtained from ASTM Headquarters. Order ASTM A0247.

ANEXO E

Norma ASTM E9

TABLE 1 Representative Compression Jigs and Specimen Dimensions for Testing of Thin Sheet^a

Type of Jig	Ref.	Thickness		Width		Length		Gage Length	
		in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm
Montgomery-Tampin:	(4 and 5)								
General use		0.016 and over	0.40 and over	0.625	16.0	2.64	67.0	1	25
Magnesium alloys		0.015 and over	0.40 and over	0.750 ^b	20.0	2.64	67.0	1	25
NACA (Kotanchik et al)	(6)	0.020 and over	0.50 and over	0.53	13.6	2.53	64.5	1	25
Moore-McDonald ^c	(7)	0.032 and over	0.50 and over	0.75 ^c	20.0	2.64	67.0	1	25
LaTour-Wolford	(8)	0.010 to 0.020	0.25 to 0.50	0.50	12.5	1.95	49.5	1	25
		0.020 and over	0.50 and over	0.50	12.5	2.00	51.0	1	25
Miller	(9-11)	0.006 to 0.010	0.15 to 0.25	0.46	12.2	2.22	56.5	1	25
		0.010 to 0.020	0.25 to 0.50	0.50	12.5	2.23	56.5	1	25
		0.020 and over	0.50 and over	0.50	12.5	2.25	57.0	1	25
Sandoffi Dillon:	(12)								
General use		0.010 and over	0.25 and over	0.50	12.5	4.12	104.5	2	50
High-strength steel		0.010 and over	0.25 and over	0.50	12.5	3.10	78.5	2	50

^a See Ref. (13) for additional jigs and specimen dimensions.

^b Reduced to 0.625 in. (16.0 mm) for 1.25 in. (30 mm) at the mid-length.

^c Reduced to 0.666 in. (16.5 mm) for 1.25 in. (30 mm) at the mid-length.

ANEXO F

Resultados de la máquina universal para el disco 1

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento de resultados de las pruebas de laboratorio	Código F-AC-LRE-002	Fecha 10-11-2011	Revisión A
	Dependencia Laboratorio de resistencia de materiales y sísmica	Aprobado Director de departamento		Pág. 1(1)

ENSAYO A COMPRESIÓN

Ensayo No.: 7311

Fecha: 12/02/2014

Cliente: Ricardo García León

Número de la Muestra: Disco 1

Obra: _____

Fecha de muestreo: 12/02/2014

Material: Fundición gris

Fecha recepción: 12/02/

Descripción: _____

Slump (cm): _____

Procedencia: _____

RESISTENCIA NOMINAL 100 Mpa Vel de ensayo _____ 6mm/min

No. de la serie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dimensiones										
a (mm)	48,8									
b (mm)	19,6									
c (mm)	0									
Área (mm ²)	0,956		0,956							
Carga máxima (kN)	329,96									
Resistencia real (Mpa)	344,970									

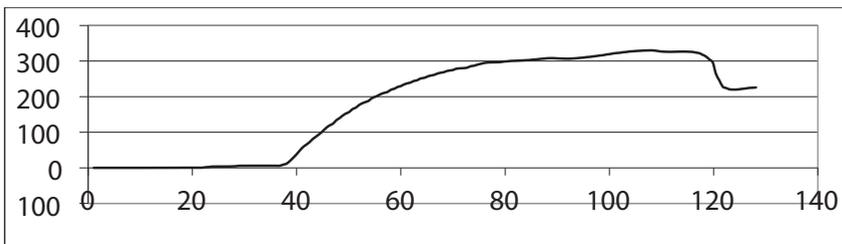


Gráfico de esfuerzo vs. tiempo

Obsevaciones: _____

Laboratorista: Iván Dario Bustos Arias

Jefe Laboratorio: Nelson Afanador G. I.C. Ms.C.

Máquina de ensayos: Pinzuar Ltda. Rango: 1000 kN

No. se serie: 109

Calibración: 27/04/2012

Iván Dario Bustos A

ANEXO G

Resultados de la máquina universal para el disco 2

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento de resultados de las pruebas de laboratorio	Código F-AC-LRE-002	Fecha 10-11-2011	Revisión A
	Dependencia Laboratorio de resistencia de materiales y sísmica	Aprobado Director de departamento		Pág. 1(1)

ENSAYO A COMPRESIÓN

Ensayo No.: 7313

Fecha: 12/02/2014

Cliente: Ricardo García León

Número de la Muestra: Disco 2

Obra: _____

Fecha de muestreo: 12/02/2014

Material: Fundición gris _____

Fecha recepción: 12/02/-14

Descripción: _____

Slump (cm): _____

Procedencia: _____

RESISTENCIA NOMINAL 400 Mpa Vel de ensayo _____ 6mm/min

No. de la serie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dimensiones										
a (mm)	30,5									
b (mm)	15,8									
c (mm)	0									
Área (mm ²)	0,482		0,482							
Carga máxima (kN)	262,97									
Resistencia real (Mpa)]	544,702									

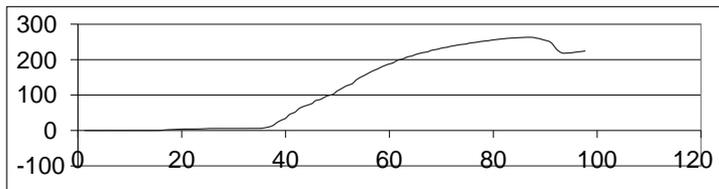


Gráfico de esfuerzo vs. tiempo

Obsevaciones: _____

Laboratorista: Iván Dario Bustos Arias

Jefe Laboratorio: Nelson Afanador G. I.C. Ms.C.

Máquina de ensayos: Pinzuar Ltda. Rango: 1000 kN No. se serie: 109

Calibración: 27/04/2012

Iván Dario Bustos A

ANEXO H

Resultados de la máquina universal para el disco 3

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento de resultados de las pruebas de laboratorio	Código F-AC-LRE-002	Fecha 10-11-2011	Revisión A
	Dependencia Laboratorio de resistencia de materiales y sísmica	Aprobado Director de departamento		Pág. 1(1)

ENSAYO A COMPRESIÓN

Ensayo No.: 7312

Fecha: 12/02/2014

Cliente: Ricardo García LeónNúmero de la Muestra: Disco 3

Obra: _____

Fecha de muestreo: 12/02/2014Material: Fundición grisFecha recepción: 12/02/-14

Descripción: _____

Slump (cm): _____

Procedencia: _____

RESISTENCIA NOMINAL 400 Mpa Vel de ensayo 6 mm/min

No. de la serie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dimensiones										
a (mm)	25									
b (mm)	19,5									d
c (mm)	0									
Área (mm ²)	0,488		0,488							
Carga máxima (kN)	170,49									
Resistencia real (Mpa)]	349,719									

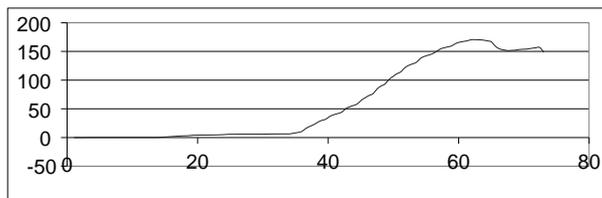


Gráfico de esfuerzo vs. tiempo

Observaciones: _____

Laboratorista: Iván Dario Bustos Arias

Jefe Laboratorio: Nelson Afanador G. I.C. Ms.C.

Máquina de ensayos: Pinzuar Ltda. Rango: 1000 kN No. se serie: 109

Calibración: 27/04/2012

Iván Dario Bustos A

ANEXO I

Resultados de la máquina universal para el disco porción 1

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento de resultados de las pruebas de laboratorio	Código F-AC-LRE-002	Fecha 10-11-2011	Revisión A
	Dependencia Laboratorio de resistencia de materiales y sísmica	Aprobado Director de departamento		Pág. 1(1)

ENSAYO A COMPRESIÓN

Ensayo No.: 7314

Fecha: 12/02/2014

Cliente: Ricardo García León

Número de la Muestra: Disco P1

Obra: _____

Fecha de muestreo: 12/02/2014

Material: Fundición gris

Fecha recepción: 12/02/-14

Descripción: _____

Slump (cm): _____

Procedencia: _____

RESISTENCIA NOMINAL 500 Mpa Vel de ensayo 6 mm/min

No. de la serie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dimensiones										
a (mm)	9									
b (mm)	6,5									
c (mm)	0									
Área (mm ²)	0,059		0,059							
Carga máxima (kN)	25,28									
Resistencia real (Mpa)]	432,178									

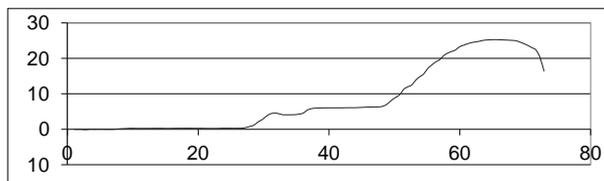


Gráfico de esfuerzo vs. tiempo

Obsevaciones: _____

Laboratorista: Iván Dario Bustos Arias

Jefe Laboratorio: Nelson Afanador G. I.C. Ms.C.

Máquina de ensayos: Pinzuar Ltda. Rango: 1000 kN No. se serie: 109

Calibración: 27/04/2012

Iván Dario Bustos A



VÍA ACOLSURE, SEDE EL ALGODONAL OCAÑA N. DE S.
Línea Gratuita Nacional 018000 121022 / PBX: 097-5690088

www.ufps.edu.co



ANEXO J

Resultados de la máquina universal para el disco porción 2

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento de resultados de las pruebas de laboratorio	Código F-AC-LRE-002	Fecha 10-11-2011	Revisión A
	Dependencia Laboratorio de resistencia de materiales y sísmica	Aprobado Director de departamento		Pág. 1(1)

ENSAYO A COMPRESIÓN

Ensayo No.: 7312

Fecha: 12/02/2014

Cliente: Ricardo García León

Número de la Muestra: Disco P2

Obra: _____

Fecha de muestreo: 12/02/2014

Material: Fundición gris

Fecha recepción: 12/02/-14

Descripción: _____

Slump (cm): _____

Procedencia: _____

RESISTENCIA NOMINAL 400 Mpa Vel de ensayo 6 mm/min

No. de la serie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dimensiones										
a (mm)	13									
b (mm)	6,5									
c (mm)	0									
Área (mm ²)	0,085		0,85							
Carga máxima (kN)	170,49									
Resistencia real (Mpa)]	20,08									

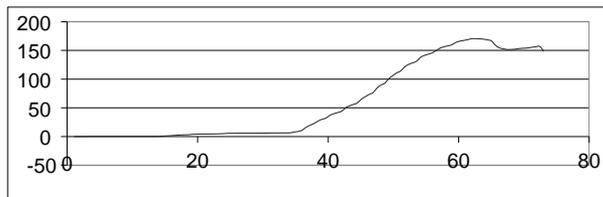


Gráfico de esfuerzo vs. tiempo

Observaciones: _____

Laboratorista: Iván Dario Bustos Arias

Jefe Laboratorio: Nelson Afanador G. I.C. Ms.C.

Máquina de ensayos: Pinzuar Ltda. Rango: 1000 kN No. se serie: 109

Calibración: 27/04/2012

Iván Dario Bustos A

ANEXO K

Resultados de la máquina universal para el Disco Porción 3

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento de resultados de las pruebas de laboratorio	Código F-AC-LRE-002	Fecha 10-11-2011	Revisión A
	Dependencia Laboratorio de resistencia de materiales y sísmica	Aprobado Director de departamento		Pág. 1(1)

ENSAYO A COMPRESIÓN

Ensayo No.: 7312

Fecha: 12/02/2014

Cliente: Ricardo García León

Número de la Muestra: Disco P3

Obra: _____

Fecha de muestreo: 12/02/2014

Material: Fundición gris

Fecha recepción: 12/02/-14

Descripción: _____

Slump (cm): _____

Procedencia: _____

RESISTENCIA NOMINAL 400 Mpa Vel de ensayo 6 mm/min

No. de la serie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dimensiones										
a (mm)	9									
b (mm)	5,2									
c (mm)	0									
Área (mm ²)	0,047		0,047							
Carga máxima (kN)	16,20									
Resistencia real (Mpa)]	346,112									

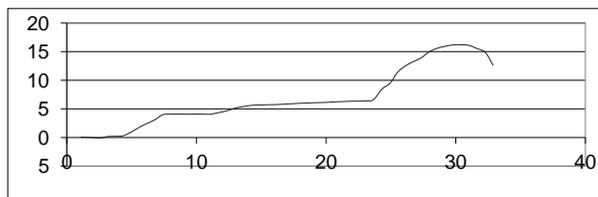


Gráfico de esfuerzo vs. tiempo

Obsevaciones: _____

Laboratorista: Iván Dario Bustos Arias

Jefe Laboratorio: Nelson Afanador G. I.C. Ms.C.

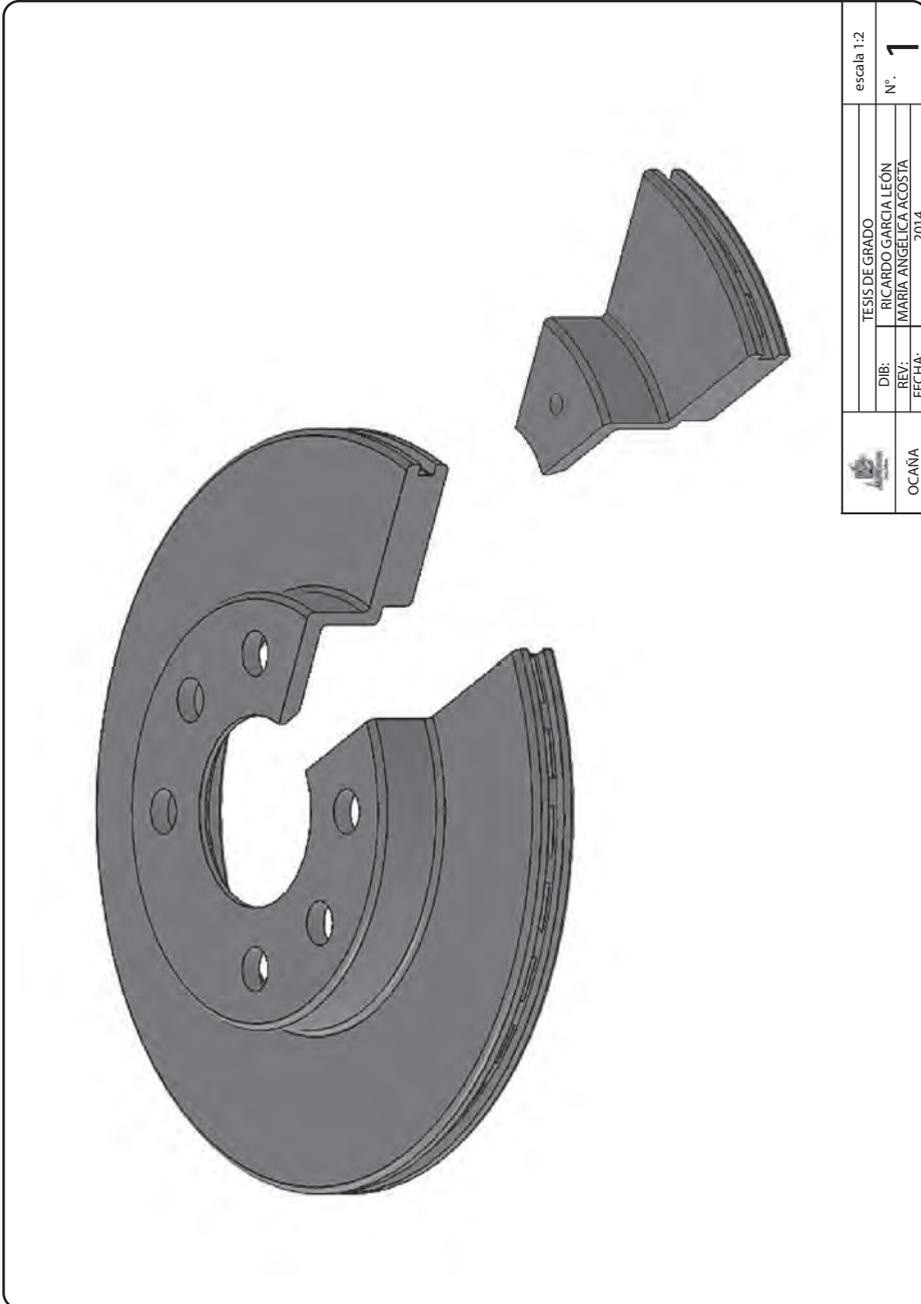
Máquina de ensayos: Pinzuar Ltda. Rango: 1000 kN No. se serie: 109

Calibración: 27/04/2012

Iván Dario Bustos A

ANEXO L

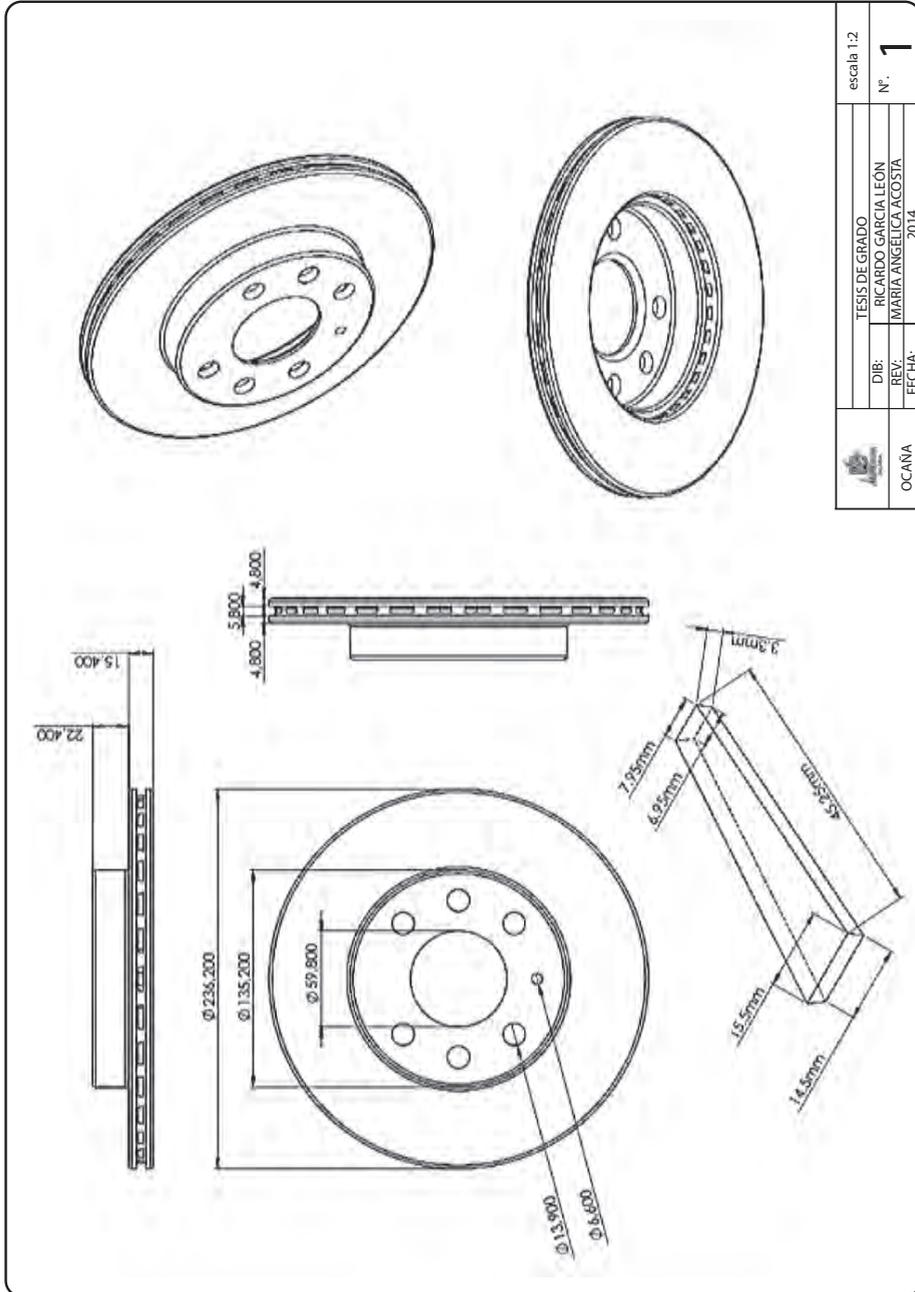
Geometría del disco 1



	OCANA	escala 1:2
	OCANA	Nº. 1
	OCANA	2014
DIB: RICARDO GARCIA LEÓN		TESIS DE GRADO
REV: MARIA ANGELICA ACOSTA		
FECHA:		

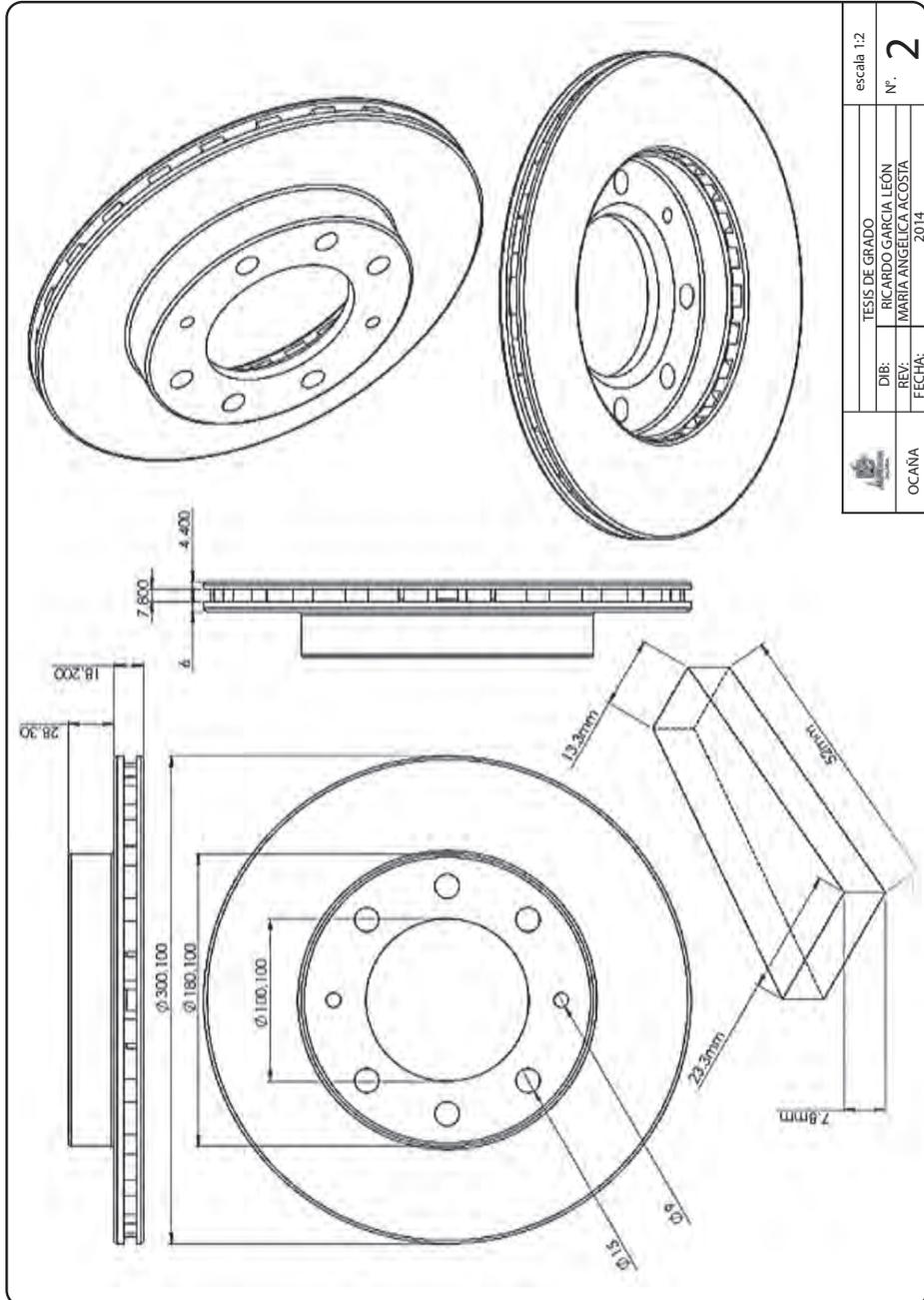
ANEXO M

Planos del disco 1



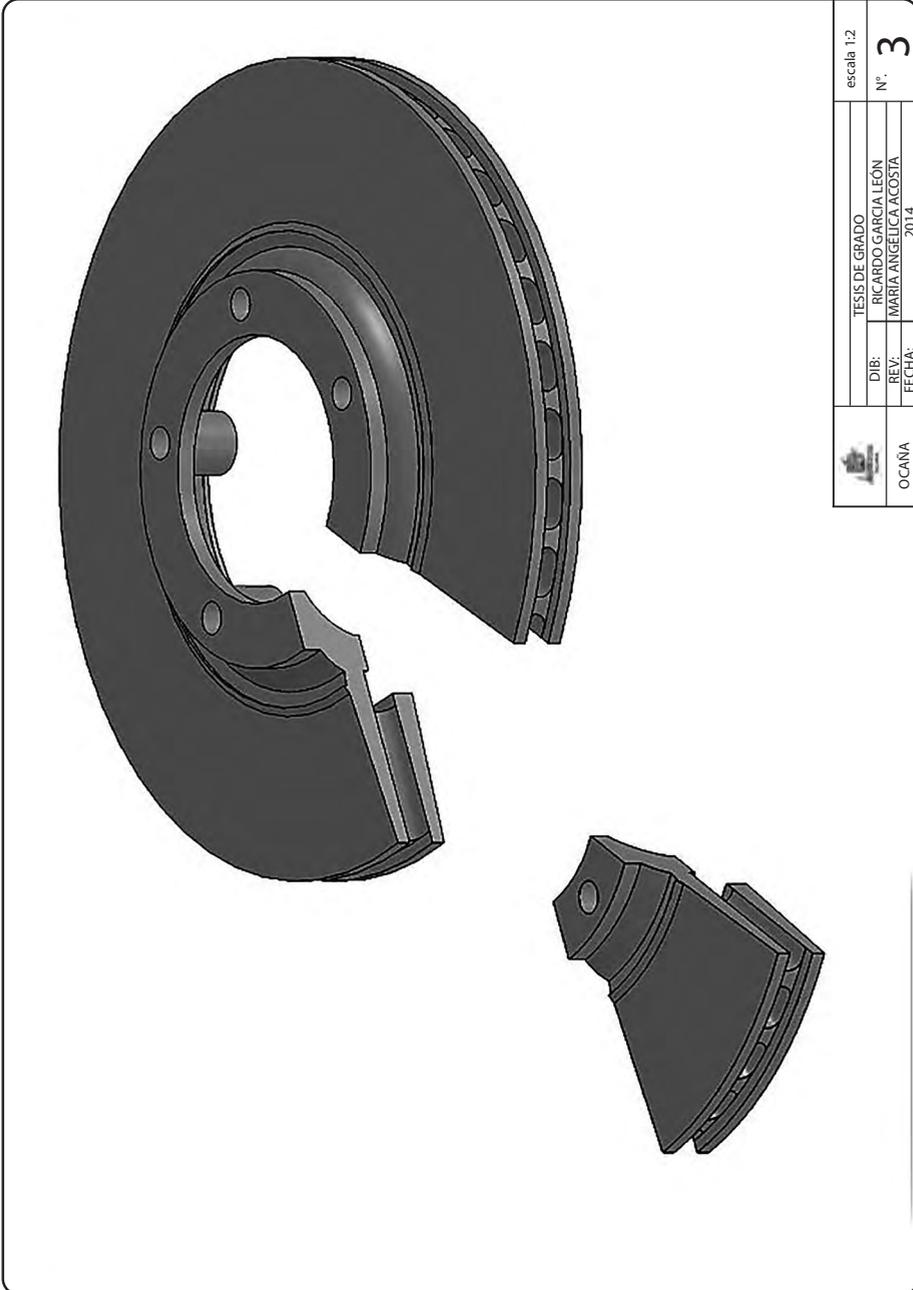
ANEXO O

Planos del disco 2



ANEXO P

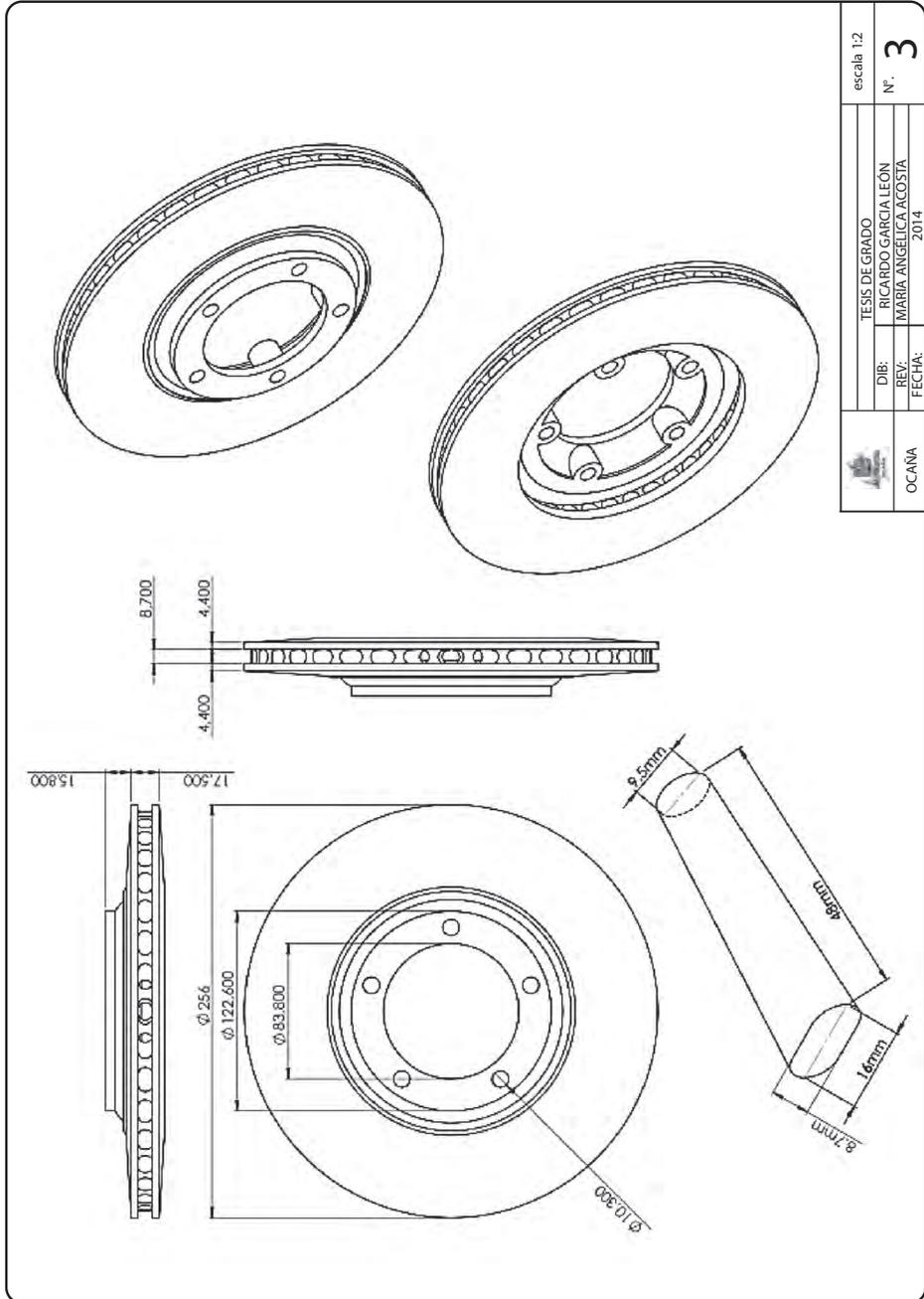
Geometría del disco 3



	escala 1:2
	TESIS DE GRADO
	DIB: RICARDO GARCIA LEÓN
	REV: MARIA ANGELICA ACOSTA
OCAÑA	FECHA: 2014
	N° 3

ANEXO Q

Planos del disco 3



Este libro fue compuesto en caracteres Minion
a 11 puntos, impreso sobre papel Bond de 75
gramos y encuadernado con el método hot melt,
en noviembre de 2019, en Bogotá, Colombia.

Análisis metalográfico y materiales de los frenos de disco

Estudiar el comportamiento de los frenos de disco autoventilados es de gran importancia para la ingeniería mecánica, debido a que en su estudio intervienen la comprensión de las leyes de transferencia de calor que afectan el comportamiento mecánico del componente, relacionados con la influencia de las características de la geometría y el tipo de material. Por lo anterior, se propone un método para el análisis metalográfico de los frenos de disco mostrando el paso a paso del proceso.

Este libro aborda de forma breve y con un lenguaje sencillo cómo caracterizar mecánicamente la fundición gris nodular a partir de los fundamentos fisicomatemáticos. Además, brinda las herramientas, procedimientos y análisis de los cálculos necesarios para evaluar el comportamiento de cualquier tipo de freno de disco con la ayuda del software *Solidworks* y *Ansys*.

La obra está dirigida a estudiantes y profesionales de Ingeniería mecánica, aeronáutica, materiales y térmicas, o interesados en el campo de la ingeniería de materiales y metalúrgica.

Incluye

- ▶ Metodología para realizar el análisis y evaluación del comportamiento mecánico de los frenos de disco autoventilados.
- ▶ Análisis de un caso práctico de estudio para tres diferentes tipos de frenos autoventilados.
- ▶ Soportes bibliográficos de revistas y libros de alto impacto a nivel nacional.
- ▶ Guía para el análisis y evaluación de diferentes geometrías con las que están fabricados los frenos de disco vehiculares.

Ricardo Andrés García-León

Ingeniero Mecánico de la UFPSO, Magíster en Ingeniería Industrial de la U. de Pamplona y estudiante de doctorado en Ingeniería Mecánica del Instituto Politécnico Nacional de México. Docente catedrático de la Facultad de Ingenierías de la UFPSO. Investigador asociado reconocido por Colciencias con más de 45 publicaciones indexadas y líder de la línea de investigación materiales y procesos industriales del Grupo de Investigación INGAP y con la participación en eventos científicos.

Jhan Piero Rojas Suárez

Ingeniero Civil de la UFPS, Magíster en Ingeniería Civil de la U. de los Andes y estudiante de doctorado en proyectos en la misma institución. Docente de tiempo completo en la UFPSO. Actualmente cuenta con más de 10 publicaciones en revistas indexadas por Colciencias, como también con la participación en eventos científicos nacionales e internacionales.

Carlos Acevedo Peñaloza

Ingeniero Mecánico de la UFPS, Magíster en Ingeniería Mecánica de la U. de los Andes y Doctor en Ingeniería Mecánica de la U. Politécnica de Cataluña, España. Docente tiempo completo e investigador del Grupo de Investigación grupo GIDIMA de la UFPS. En la actualidad cuenta con más de 10 publicaciones en revistas [indexadas por](#)



Universidad Francisco
de Paula Santander
Vigilada Mineducación

