



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Azcapotzalco

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

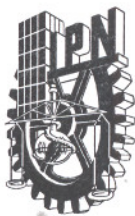
**“INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS GRAFITIZANTES SOBRE LAS
PROPIEDADES MECÁNICAS Y TÉRMICAS DE UN
DISCO DE FRENO AUTOMOTRIZ DE HIERRO
GRIS HIPEREUTÉCTICO”**

**T E S I S PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA DE MANUFACTURA PRESENTA:
PRESENTA:**

ING. ROBERTO JIMÉNEZ LEDESMA

DIRECTOR: DRA. GUADALUPE JULIANA GUTIERREZ PAREDES
MÉXICO D. F. AGOSTO 2011





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 12:00 horas del día 25 del mes de Julio del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIME UA para examinar la tesis titulada:

"Influencia de los elementos grafitizantes sobre las propiedades mecánicas y térmicas de un disco de freno automotriz de hierro gris hipereutético"

Presentada por el alumno:

Jiménez
Apellido paterno

Ledesma
Apellido materno

Roberto
Nombre(s)

Con registro:

B	0	7	1	4	3	0
---	---	---	---	---	---	---

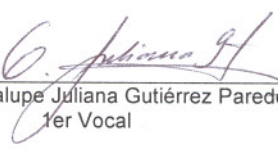
aspirante al grado de:

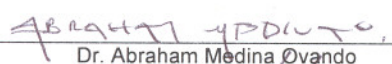
Maestría en Ingeniería de Manufactura

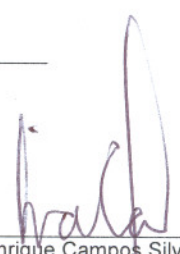
Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director(a) de tesis


Dra. Guadalupe Juliana Gutiérrez Paredes
1er Vocal


Dr. Abraham Medina Ovando
Presidente


Dr. Iván Enrique Campos Silva
Secretario


Dr. Abel López Villa
2do Vocal


Dr. Ricardo Cuenca Álvarez
3er Vocal

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES


Dr. Jaime Pacheco Martínez

UNIDAD PROFESIONAL
AZCAPOTZALCO
SECCION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACION

Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación
Unidad Azcapotzalco

México, D.F. a 2 de Agosto de 2011

ACUERDO DE CONFIDENCIALIDAD

En el presente documento se hace constar que los profesores que suscriben: Dra. Guadalupe Juliana Gutiérrez Paredes, Dr. Abel López Villa, Dr. Abraham Medina Ovando, Dr. Iván Enrique Campos Silva, Dr. Ricardo Cuenca Álvarez, Dr. Orlando Susarrey Huerta (profesores investigadores de SEPI – ESIME – UA del Instituto Politécnico Nacional), reconocen que con motivo de su participación en la dirección y asesoría de Tesis respectivamente del alumno de Maestría en Ingeniería de Manufactura, el C. Roberto Jiménez Ledesma, hemos tenido acceso y conocemos el trabajo de tesis desarrollado por el alumno C. Roberto Jiménez Ledesma y cuyo título se denomina “Influencia de los elementos grafitizantes sobre las propiedades mecánicas y térmicas de un disco de freno automotriz de hierro gris hipereutético” desarrollado en esta escuela, conocemos su naturaleza, características, los métodos o procesos de producción y finalidades de sus productos y demás información toda clasificada como “INFORMACION CONFIDENCIAL”, la cual es propiedad del IPN.

Enterados de que las acciones para su adecuada protección intelectual están en proceso ante las autoridades correspondientes y de las ventajas que la confidencialidad le significa al IPN, me dirijo a guardar y preservar la confidencialidad de los datos, documentos (protocolos y técnicas), características de los procesos, alcances, detalles de experimentos, incluyendo la información en cuyo desarrollo haya participado en cumplimiento de mis funciones, es decir de la “INFORMACION CONFIDENCIAL” a que tenga acceso; no usarla, revelarla y/o hacerla accesible a algún tercero por medio impreso, verbal, electrónico, conferencias, publicidad o cualquier otra forma o medio conocido o por conocerse; y no exportarla, comercializarla, venderla o licenciarla, ya sea en parte o en su conjunto, debiendo observar lo anterior tanto en México como en el extranjero.

La obligación señalada en el párrafo anterior, será durante (nuestra relación laboral, mi participación, mi colaboración, etc.) y subsistirá después de concluida, hasta que el IPN nos notifique en forma expresa el cese de dicha obligación.

Manifestamos tener conocimiento de la utilización de la “INFORMACION CONFIDENCIAL” de forma ilícita, impropia o sin autorización, causa perjuicio al IPN ya que son actos que constituyen delitos previos en el artículo 223 de la ley de la Propiedad Industrial; y que independientemente de las sanciones penales a los infractores, prevén a favor de su titular el pago de daños y perjuicios.

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
UNIDAD AZCAPOTZALCO

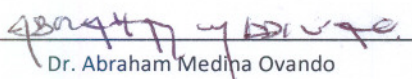
Directores de la tesis



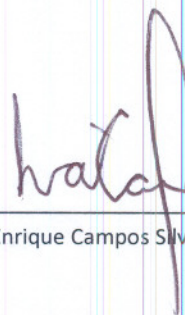
Dra. Guadalupe Juliana Gutiérrez Paredes



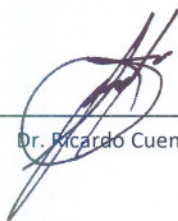
Dr. Abel López Villa



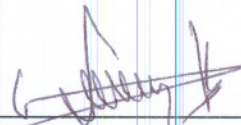
Dr. Abraham Medina Ovando



Dr. Iván Enrique Campos Silva



Dr. Ricardo Cuenca Álvarez



Dr. Orlando Susarrey Huerta



C. Alumno
Ing. Roberto Jiménez Ledesma

AGRADECIMIENTOS

- Al Instituto Politécnico Nacional, mi alma mater, por mi formación académica y profesional
- A CHRYSLER, por las facilidades e instalaciones para el desarrollo de las pruebas requeridas para este trabajo.
- A la ESIME Unidad Azcapotzalco, por la hospitalidad y facilidades otorgadas para la realización de este trabajo.
- Al CIITEC, por el equipo e instalaciones que permitieron desarrollar este trabajo.
- A la ESIQIE, por los equipos e instalaciones que facilitaron la obtención de la información para este trabajo.
- A la Dra. Juliana, por las facilidades, hospitalidad y apoyo para llevar acabo el presente trabajo
- Al M. en C. José Luis, por compartirme sus conocimientos y vasta experiencia para la realización de las pruebas y obtención de resultados.
- Al Dr. Gabriel Plascencia Barrera, por susconsejos recibidos durante el desarrollo de este trabajo.
- Al Dr. Abraham Medina Ovando, por la asesoría y apoyo en el desarrollo de este trabajo.
- A los Sinodales, por su consejo y tiempo dedicado a la revisión de este trabajo de tesis.
 - Dr. Abraham Medina Ovando
 - Dr. Abel López Villa
 - Dr. Ricardo Cuenca Álvarez
 - Dr. Orlando Susarrey Huerta
 - Dr. Iván Enrique Campos Silva
- Al Ing. Eric Mena Pérez, por toda su dedicación y apoyo en la realización de las pruebas para lograr este trabajo de tesis.
- A los proyectos SIP 20080595, SIP 20090785, SIP 20100291

DEDICATORIAS

- A mi esposa:
Fabiola López

Le dedico este logro, gracias a su apoyo y comprensión, me dio las fuerzas necesarias para seguir adelante y alcanzar mis metas. Gracias de todo corazón. Siempre te estaré agradecido, me ayudaste a que esto fuera posible, te amo.

- A mis padres:
Sra. Esther Ledesma.
Sr. Roberto Jiménez.

Por su apoyo, he logrado uno más de mis objetivos, gracias.

- A mi hermano:
Alejandro Jiménez.

Con aprecio y cariño, para que continúe con las metas que se ha trazado y como un estímulo para su futuro.

- A mi amigo:
Omar Garrido†.

Por brindarme su amistad y apoyo, para alcanzar esta meta en mi vida y seguir adelante.

- A la ESIME UA y maestros

Por las facilidades, hospitalidad, apoyo y consejos recibidos durante mi estancia para hacer de mí una persona de bien.

- A Dios:

Por guiar mi camino, darme siempre la fuerza para seguir adelante y por haberme permitido vivir una experiencia como esta.

Indice.....	4
Resumen.....	7
Abstract	8
Lista de figuras	9
Lista de tablas	12
Nomenclatura	13
Justificación	15
Objetivo general.....	16
Metodología del proyecto.....	17

Capítulo 1. Antecedentes

1. Introducción	18
1.1. Frenos hidráulicos	19
1.2. Componentes de los frenos hidráulicos	19
1.3. Frenos de disco.....	20
1.4 Ventajas que representan los frenos de discos	22

Capítulo 2. Disco de freno

2. Disco de freno	23
2.1 Composición química.....	24
2.2 Geometría	24
2.3 Esfuerzos mecánicos y térmicos.....	27

Capítulo 3. Hierro gris

3. Características del hierro gris	30
3.1 Hierro hipereutético	32
3.2 Influencia de los elementos grafitizantes	33
3.3 Influencia del grafito sobre las propiedades generales de los hierros	35

Capítulo 4. Metodología experimental

4. Diseño experimental	37
4.1 Diseño de las aleaciones	38
4.2 Selección del proceso de moldeo y fundición.....	38
4.2.1 Técnicas de moldeo, preparación de la carga metálica, fundición y colada	38
4.3 Caracterización general de los discos de freno diseñados y fabricados	39
4.3.1 Análisis químico	40
4.3.2 Análisis micro estructural.....	40
4.3.3 Pruebas mecánicas	42
4.3.4 Pruebas no destructivas (Líquidos penetrantes)	44
4.3.5 Pruebas de desgaste	47
4.3.6 Pruebas térmicas.....	48
4.3.6.1 Descripción del experimento	51
4.3.7 Validación del diseño	53

Capítulo 5. Resultados obtenidos, análisis y discusión

5.1 Análisis químico.....	58
5.2 Análisis micro estructural	58
5.3 Pruebas mecánicas.....	62

5.4 Influencia de los elementos grafitizantes sobre las propiedades mecánicas	63
5.5 Influencia de los elementos grafitizantes sobre las propiedades térmicas	66
Conclusiones	72
Recomendaciones para trabajos futuros	73
Referencias bibliográficas	74
Apéndice 1. Norma ASTM A-247.....	77
Apéndice 2. Publicaciones generadas durante el presente trabajo	80

RESUMEN

Uno de los sistemas fundamentales en todo automóvil es el que le confiere la capacidad de reducción de su velocidad, incluso llegando a detenerlo si así lo decide el conductor convirtiéndolo en un sistema con elementos de seguridad activa y más importante en el diseño y ensamblaje automotriz. Dicho sistema es el sistema de frenado.

El principio de funcionamiento de dicho sistema es la transformación de la energía cinética en energía calorífica. Este fenómeno de transformación de energía se encuentra basado en el mecanismo de fricción entre pastilla y disco. El sistema de frenado de un automóvil debe satisfacer un conjunto complejo de requerimientos, donde la seguridad es el más importante. Los frenos deben trabajar de forma segura y predecible en cualquier circunstancia, lo cual implica disponer de un nivel estable de fricción bajo cualquier condición de temperatura y factores ambientales. Durante el diseño de los discos de freno, se hace necesario considerar diferentes aspectos (geometría, peso, material, máxima temperatura de trabajo, resistencia al agrietamiento, deformación térmica, colada, ruido, etc.). Todos estos aspectos deben ser incluidos en una apropiada metodología de diseño.

En el presente trabajo se determinó la influencia de los elementos grafitizantes sobre las propiedades mecánicas y térmicas de aleaciones de hierros hipereutéticos para aplicación en disco de freno automotriz. El diseño de las aleaciones fue realizado con la variación de los contenidos de los elementos grafitizantes (cobre y níquel), la fabricación de las aleaciones diseñadas se efectuó mediante el proceso de fundición por moldeo en verde. La caracterización mecánica y térmica de las aleaciones diseñadas de los discos de freno se efectuó por medio de ensayos destructivos y no destructivos. Se determinó la influencia de los elementos grafitizantes sobre las propiedades mecánicas y térmicas. Se obtuvieron los siguientes resultados:

Los discos de freno con carbono equivalente mayores a 4.30% presentaron una disminución en la resistencia mecánica y dureza brinell, también se incrementó la formación de ferrita fase no deseada y la morfología de los grafitos que se presentaron fue de tipo C con tipo A en una relación de 50:50.

Los discos de freno con carbono equivalente entre 4.40% y 4.50% obtenidos presentaron disminución de sus propiedades mecánicas las cuales están dentro de las especificadas por las normas.

Se observó una influencia marcada de los contenidos de silicio entre 1.70% y 2.06% sobre la morfología (forma y tamaño) de las hojuelas de los grafitos tipo A obteniéndose tamaños 3, 4 y 5 distribuidas sin una orientación definida en toda la matriz del hierro deseables para estos hierros.

ABSTRACT

One of the fundamental systems of every car is what gives it the ability to slow it right down to it so decided to stop the driver making them active safety elements most important in automotive design and assembly. This system is the brake system.

The principle of operation of a braking system is the reduction of kinetic energy to transform into heat energy. This energy transformation is based on the mechanism of friction between pad and disc. The braking system of a car must meet a complex set of requirements, where safety is the most important. The brakes must work safely and predictably under all circumstances, which means having a stable level of friction under all conditions of temperature and environmental factors. During the design of brake discs, it is necessary to consider different aspects (geometry, weight, material, maximum working temperature, resistance to cracking, noise, etc.). All these aspects should be included in an appropriate design methodology.

In the present study determined the influence of the graphitizing elements on mechanical and thermal properties of hypereutectic iron alloy for use in automotive brake disc. The design of the alloys was carried out with varying contents graphitizing elements (copper and nickel), manufacture of alloys designed was made by mold casting process in green. The mechanical and thermal characterization of alloys designed brake discs are made by destructive and non destructive testing. It was determined the influence of the graphitizing elements on mechanical and thermal properties. It was obtained the following results:

The brake discs with higher carbon equivalent to 4.30% showed a decrease in mechanical strength and Brinell hardness, also increased the formation of ferrite phase is not required and the morphology of the graffiti that occurred was of type C with type A in a50:50 ratio.

Disc brakes with carbon of between 4.40% and 4.50% obtained showed a decrease in mechanical properties which are within the specified standards.

There was a marked influence of silicon content between 1.70% and 2.06% on the morphology (shape and size) of flake graphite type A obtained sizes 3, 4 and 5 without a definite orientation distributed throughout the matrix of iron desirable for these irons.

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO 1

Fig. 1.1 Caliper y disco de freno.....	18
Fig. 1.2 Componentes del sistema de frenos hidráulicos.....	19
Fig. 1.3 Sistema de frenos de disco.....	21
Fig. 1.4 Prueba de banco.....	21
Fig. 1.5 Puntos de concentración de calor.....	21

CAPITULO 2

Fig. 2.1 Disco de freno.....	23
Fig. 2.2 Elementos químicos de un disco de freno.....	24
Fig. 2.3 Geometría de un disco de freno	25
Fig. 2.4 Filtro térmico.....	26
Fig. 2.5 Pistas separadas por aletas.....	27
Fig. 2.6 Aletas rectas.....	27
Fig. 2.7 Fuerzas en el disco de freno.....	28
Fig. 2.8 Concentración de calor.....	28
Fig. 2.9 Superficie azulada y pequeñas fisuras en disco.....	29

CAPITULO 3

Fig. 3.1 Micro estructura fundición gris.....	32
Fig. 3.2 Diagrama Hierro-Carbono.....	33

CAPITULO 4

Fig. 4.1 Metodología experimental.....	37
Fig. 4.2 Proceso de vaciado del material.....	39
Fig. 4.3 Molde de fundición.....	39
Fig. 4.4 Espectrómetro por emisión o de chispa.....	40
Fig. 4.5 Probeta para análisis químico.....	40
Fig. 4.6 Probeta para análisis metalográfico.....	41
Fig. 4.7 Ataque químico.....	41
Fig. 4.8 Analizador de imágenes.....	41
Fig. 4.9 Extracción de las probetas para el ensayo de tensión.....	42
Fig. 4.10 a) Máquina de tensión, b) Mordazas de la máquina de tensión.....	43
Fig. 4.11 Extracción de la probeta para Ensayo de dureza Brinell.....	43
Fig. 4.12 Durómetro Brinell.....	44
Fig. 4.13 Indentaciones en la probeta de ensaye de Dureza Brinell.....	47
Fig. 4.14 Corte transversal de un freno de rotor.....	45
Fig. 4.15 Aplicación de líquidos penetrantes pista exterior del disco.....	45
Fig. 4.16 Aplicación de líquidos penetrantes pista interior del disco.....	46
Fig. 4.17 Grieta vista a través de microscopio.....	46
Fig. 4.18 Grieta vista a través de luz UV.....	46
Fig. 4.19 Aplicación de líquidos penetrantes a disco diseñado.....	47
Fig. 4.20 Revelación de grietas en pista exterior.....	47
Fig. 4.21 Máquina tribológica de abrasión seca.....	48
Fig. 4.22 Cilindros fabricados para el experimento de medición.....	48
Fig. 4.23 Probetas de aleaciones.....	49
Fig. 4.24 Resistencia eléctrica utilizada para el experimento.....	49
Fig. 4.25 Concepto de la técnica experimental de medición.....	49
Fig. 4.26 Equipo utilizado en experimento de conductividad térmica.....	52
Fig. 4.27 Montaje de las probetas y la resistencia utilizada en la medición de K.....	52
Fig. 4.28 Evolución de las temperaturas promedio.....	53

Fig. 4.29 Termografías infrarrojas de la distribución de temperaturas máximas durante el frenado.....	54
Fig. 4.30 Instantáneas térmicas del frenado.....	55
Fig. 4.31 El perfil de temperatura.....	56
Fig. 4.32 El cambio puntal de la temperatura máxima en función del tiempo.....	57
Fig. 4.33 Temperatura superficial promedio lado izquierdo (rojo) y lado derecho (azul) del rotor.....	57

CAPITULO 5

Fig. 5.1 Microestructuras de discos D1 fabricado experimentalmente y disco D2 que está en estudio en este trabajo.....	59
Fig. 5.2 Microestructuras de discos D3 y D4 fabricados experimentalmente.....	60
Fig. 5.3 Microestructuras de discos D5 y D6 fabricados experimentalmente.....	61
Fig. 5.4 Influencia de los elementos grafitizantes en las propiedades mecánicas.....	63
Fig. 5.5 Influencia del carbono equivalente en las propiedades mecánicas.....	63
Fig. 5.6 Influencia del carbono en las propiedades mecánicas.....	64
Fig. 5.7 Influencia del cobre en las propiedades mecánicas.....	64
Fig. 5.8 Influencia del silicio en las propiedades mecánicas.....	65
Fig. 5.9 Conductividad térmica de hierros hipoeutéticos vs hierros hipereutéticos.....	66
Fig. 5.10 Porcentajes de composición química de probetas utilizadas para medir conductividad.....	69
Fig. 5.11 Conductividad térmica experimental de hierro hipereutético e hipoeutético.....	69
Fig. 5.12 Conductividad térmica experimental promedio de la muestras de hierro hipereutético e hipoeutético.....	70

APENDICE

Fig. A1.1 Distribución del grafito según ASTM A-247.....	77
Fig. A1.2 Tamaños de hojuelas de grafito según ASTM A-247.....	78

LISTA DE TABLAS

CAPITULO 2

Tabla No. 2 Propiedades mecánicas de un disco de freno.....	23
---	----

CAPITULO 4

Tabla No. 4 Resultados de análisis metalográficos y pruebas mecánicas.....	42
--	----

CAPITULO 5

Tabla No. 5.1 Composiciones químicas determinadas.....	58
Tabla No. 5.2 Micro estructuras y morfología obtenida en los discos.....	58
Tabla No. 5.3 Resultados de pruebas mecánicas a discos fabricados experimentalmente	62
Tabla No. 5.4 Modulo de elasticidad de discos fabricados experimentalmente.....	62
Tabla No. 5.5 Valores de conductividad térmica de hierros hipoeutéticos contra hierros hipereutéticos.....	66
Tabla No. 5.6 Composiciones químicas de probetas para medir conductividad térmica...	68
Tabla No. 5.7 Conductividad térmica experimental de probetas Hiper 1 a Hiper 3.....	70
Tabla No. 5.8 Conductividad térmica experimental de probetas Hipo 1 a Hipo 5.....	70
Tabla No. 5.9 Comparativo del Ni, Cu y Cr entre hipereutético e hipoeutético	71
Tabla No.5.10 Comparativo entre elementos que forman el CE.....	71

APENDICE

Tabla No. A1.1 Tamaño de las hojuelas en mm según ASTM A 247	78
Tabla No. A1.2 Longitud de las hojuelas de grafito a 100x, de acuerdo a la ASTM A-247.....	79

NOMENCLATURA

N => Newton.

mm^2 => Milímetros cuadrados.

HB => Siglas en ingles *Hardness Brinell* (Dureza Brinell).

W => Watts.

MPa => MegaPascales.

km => Kilometros.

hr => Hora.

Fe => Fierro.

C => Carbono.

M => Mega.

J => Joule.

$ASTM$ => American Society for Testing Materials

SAE => Society Automotive Engineers

AFS => American Foundry Society

psi => Libra por pulgada.

X => Aumentos.

ml => Mililitros.

C => Carbono.

S => Azufre.

Si => Silicio.

Mn => Manganeseo.

Cr => Cromo.

Mo => Molibdeno.

Ni => Niquel.

Cu => Cobre.

P => Fósforo.

Sn => Estaño.

D1 => Disco 1 fabricado experimentalmente

D2 => Disco 2 que presenta problemas de durabilidad

D3 => Disco 3 fabricado experimentalmente

D4 => Disco 4 fabricado experimentalmente

D5 => Disco 5 fabricado experimentalmente

D6 => Disco 6 fabricado experimentalmente

D7 => Disco 7 fabricado experimentalmente

JUSTIFICACION

El sistema de frenado de un automóvil tiene por misión detener el vehículo a voluntad del conductor ya sea por necesidades de circulación o por evitar colisiones y atropellos.

Para conseguir detener el vehículo el sistema de frenos debe transformar la energía cinética que éste ha adquirido, gracias a la potencia desarrollada por el motor, y transferirla a un sistema externo hasta hacerla desaparecer.

El sistema de frenado es un mecanismo basado, en la mayoría de los casos, en un circuito hidráulico que lleva acoplados los mecanismos pertinentes para generar en las ruedas los efectos que permitan detener o aminorar la velocidad del vehículo.

En las ruedas el mecanismo de frenos, cuando es activado, aplica con una fuerza, proporcional a la ejercida por el conductor sobre el pedal de freno, a través de una balata de material antideslizante contra un elemento metálico, llamado disco o tambor según sea el tipo de freno, que gira solidario con la rueda; de esta manera, gracias al rozamiento entre la balata y metal, se transforma parte de la energía cinética del vehículo en calor, que es transferido por radiación y convección al medio ambiente, a la vez que se genera una fuerza de retardo, en la banda de rodamiento del neumático y sobre el suelo, opuesta a las fuerzas de inercia que siguen empujando el móvil.

Se conoce que los discos de freno fabricados de hierro gris sufren deformaciones debido a los esfuerzos mecánicos y térmicos presentes durante el frenado en un automóvil convencional, esto está directamente relacionado con la composición química y la morfología de las hojuelas de grafito. Debido a esto, es necesario diseñar un material que resista los esfuerzos mecánicos y térmicos. Esto se logra a través de la adición de elementos que promuevan la formación de hojuelas de grafito en el momento del proceso de solidificación del material.

Para resolver el problema de falla temprana del componente automotriz (deformación mecánica y térmica de los discos de freno)

OBJETIVO GENERAL

El presente trabajo tiene como principal finalidad el determinar la influencia de los elementos grafitizantes sobre las propiedades mecánicas y térmicas de aleaciones de hierros hipereutécticos para aplicación en disco de freno automotriz.

Como objetivos específicos tenemos:

1. Diseño de aleaciones hipereutécticas con diferentes contenidos de elementos grafitizantes (cobre y níquel)
2. Fabricación de las aleaciones diseñadas mediante el proceso de fundición por moldeo en verde
3. Caracterización mecánica y térmica de los discos de freno (aleaciones diseñadas) por medio de ensayos destructivos y no destructivos.
4. Determinación de la influencia de los elementos grafitizantes sobre las propiedades mecánicas y térmicas.

METODOLOGIA DEL PROYECTO

La siguiente metodología fue empleada para desarrollar el presente proyecto:

1. Análisis de falla del componente en cuestión con la finalidad de determinar las causas que llevaron al componente a fallar de manera prematura.
2. En base a la determinación de las causas que provocaron la falla del componente, determinar los principales aspectos que lleven a la solución óptima del problema: diseño del material, diseño geométrico, proceso de manufactura del componente.
3. Rediseño del material tomando en consideración la función primordial de componente y sus principales requerimientos para su desempeño durante la aplicación, el cual radica específicamente sobre las propiedades mecánicas, físicas y térmicas.
4. Fabricación por medio de fundición de las aleaciones diseñadas propuestas para resolver el problema de falla prematura, considerando a los elementos de aleación como fundamentales sujetos de estudio, debido a la influencia que presentan sobre la constitución y estructura de los hierros grises y por consiguiente sobre las propiedades mecánicas, físicas y térmicas.
5. Caracterización general de las aleaciones de hierro gris, efectuada para determinar el porcentaje composicional de los elementos químicos que constituyen a las aleaciones propuestas, las estructuras generadas, y las propiedades mecánicas y de desgaste, físicas y térmicas obtenidas. En esta etapa se ejecutan pruebas destructivas y no destructivas.
6. Validación de las aleaciones diseñadas por medio de pruebas fiables.(Análisis termomecánico: Pruebas dinamométricas en banco de pruebas).
7. Análisis de los resultados obtenidos y la generación de las conclusiones a las que lleva la secuencia metodológica en el desarrollo del presente proyecto.

CAPITULO 1. ANTECEDENTES

1. Introducción



Figura 1.1 Caliper y disco de freno

Un auto es un móvil que se desplaza bajo control del conductor. Es acelerado con la fuerza (torque) y potencia del motor y desacelerado con la resistencia del mismo, pero sobre todo con la aplicación de los frenos, el sistema primordial de seguridad.

Un auto pesa entre unos 800 y 2500 Kg. según su tamaño y equipamientos, estando en marcha no se puede parar inmediatamente cuando el motor se desconecta del tren de fuerza, debido a la inercia, la cual varía con la velocidad y para controlarla, disminuirla o anularla, se utilizan los frenos instalados en cada una de las cuatro ruedas. La fig. 1.1 muestra los componentes del sistema de freno instalados en la rueda.

Los frenos deben responder lo más exactamente posible a la solicitud del conductor. La principal función de un sistema de frenos es la de disminuir o anular progresivamente la velocidad del vehículo, o mantenerlo inmovilizado cuando está detenido. Deben ser al mismo tiempo sensibles y graduables para modular la velocidad, y asegurar la detención completa y la inmovilización total del vehículo¹.

En conjunto las exigencias de los frenos son:

- Seguridad de funcionamiento 100%
- Alto confort de frenado
- Alta resistencia térmica y mecánica
- Resistencia a la corrosión

Los frenos trabajan por rozamiento entre una parte móvil instalada en las ruedas y otra parte fijada a la estructura del auto. Al aplicarse los frenos, la parte fija se aprieta a la parte móvil y por fricción se consigue desacelerar el auto. Esta fricción emite calor y absorbe la energía de la inercia (a 120 Km/h un auto de 1.200 Kg aplica una potencia de frenado de más de 200 HP, lo que disipará calor hasta en una temperatura de 800°C). Para que los frenos sean más eficaces, las superficies en rozamiento deben ser muy planas para lograr un máximo contacto.

Un freno es eficaz, cuando al activarlo se obtiene la detención del vehículo en un tiempo y distancia mínimos¹.

1.1. Frenos hidráulicos

En función de las exigencias y tipo de vehículo se emplean sistemas con distintas fuerzas de transmisión. Este sistema se basa en que los líquidos son prácticamente incompresibles y además de acuerdo con el Principio de Pascal, la presión ejercida sobre un punto cualquiera de una masa líquida se transmite íntegramente en todas direcciones. Al ejercer una fuerza con el pie en un émbolo pequeño el fluido la transmite y, según la relación entre las secciones de los émbolos, la amplifica. También cambia la dirección y el sentido la fuerza aplicada

Los frenos hidráulicos están divididos en dos tipos de sistemas fundamentales:

- Los sistemas hidráulicos
- Materiales de fricción.

En los sistemas hidráulicos, cuando el freno del vehículo es presionado, un cilindro conocido como maestro dentro del motor, se encarga de impulsar líquido de frenos a través de una tubería hasta los frenos situados en las ruedas, la presión ejercida por el líquido produce la fuerza necesaria para detener el vehículo.

Las pastillas ó materiales de fricción, suelen ser piezas metálicas o de cerámica capaces de soportar altas temperaturas. Estas piezas son las encargadas de crear fricción contra una superficie fija (discos), logrando así el frenado del vehículo.²

1.2. Componentes de los frenos hidráulicos

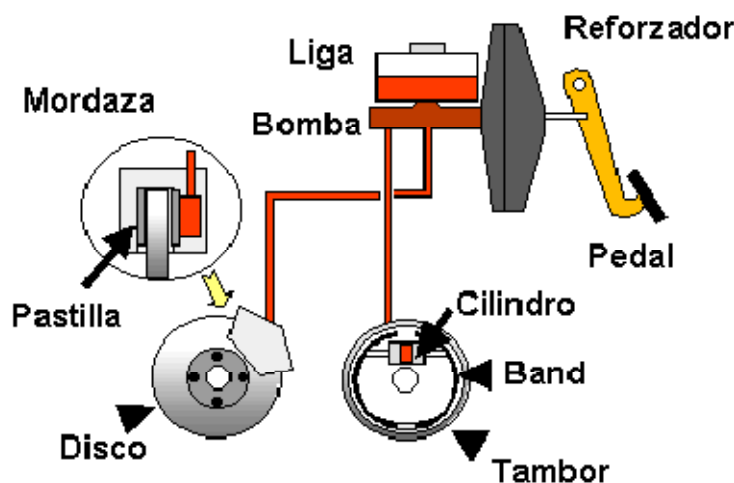


Figura 1.2 Componentes del sistema de frenos hidráulico

La figura 1.2 Muestra los componentes de un sistema de frenos para automóvil.

Cilindro maestro

La bomba de frenos o cilindro maestro es la encargada de proporcionar la debida presión al líquido, enviándolo a los cilindros de las ruedas. Genera la presión hidráulica en el circuito de freno y controla el proceso de frenado. Recibe la presión de pedal de freno a través del auxilio del amplificador de fuerza de frenado y presiona el líquido de freno hasta los cilindros de las ruedas.

Válvula dosificadora

Forma parte del dispositivo de transmisión y permite dividir las líneas de transmisión del fluido en dos circuitos independientes. Una línea lógicamente llevaría la fuerza del fluido hacia las ruedas traseras, y la otra lo haría, hacia las ruedas delanteras.

Booster (reforzador de frenos por vacío)

La función del booster o reforzador de frenos es minimizar la fuerza requerida, para presionar el pedal y obtener respuesta de frenado. Es un amplificador de fuerza de frenado que aprovecha la depresión generada en la cámara de combustión para incrementar la fuerza del pie del conductor del vehículo. Puede amplificar la fuerza del pedal de freno hasta 5 veces.

Caliper o Mordaza

Es la parte que se encuentra instalada en el rotor de freno y tiene la función de recibir la fuerza hidráulica, que viene del cilindro maestro, como respuesta, mueve el pistón que tiene instalado dentro de él, para presionar las pastillas contra el rotor, cumpliéndose de esta forma la acción de frenado.

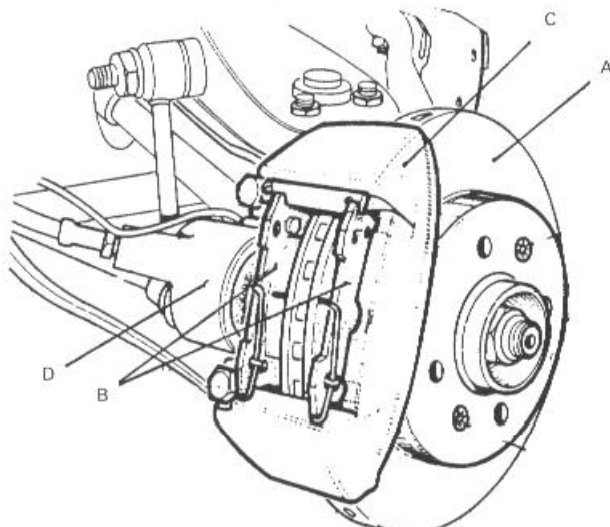
Cilindro de rueda

Esta parte se encuentra ubicada en la estructura o plato de la rueda de atrás, tiene la función de recibir la fuerza hidráulica que viene del cilindro maestro, y como respuesta genera presión mecánica. Esta fuerza presiona las balatas o zapatas hacia los tambores creando una fricción que obligará al vehículo a reducir la velocidad hasta frenarlo.

1.3. Sistema de frenos de disco

Consisten en un disco metálico sujeto a la rueda, en cada una de sus caras están las pastillas, que son planas y puestas en funcionamiento, aferran el disco con una acción de pinzas. La presión hidráulica ejercida desde el cilindro maestro causa que un pistón presione las pastillas por ambos lados del rotor, esto crea suficiente fricción entre ambas piezas para producir un descenso de la velocidad o la detención total del vehículo.

En los frenos de discos (a) Figura 1.2, el disco puede ser frenado por medio de unas balatas (b), que son accionadas por un émbolo (c) y pinza de freno (d), que se aplican lateralmente contra él deteniendo su giro. Suelen ir convenientemente protegidos y refrigerados, para evitar un calentamiento excesivo de los mismos.



- (a) Disco de freno
- (b) Pastillas ó balatas
- (c) Embolo ó Pistón
- (d) Pinza de freno ó Caliper

Figura 1.3 Sistema de freno de disco

Los frenos de disco pueden ser de tres categorías: flotantes (la tuerca que sostiene las pastillas flota sobre cuatro sostenes de caucho, oscilando cada vez que se aplican los frenos), fijos (está bien sujeta por cuatro pistones, dos de cada lado del disco) o deslizantes (está suspendida por sostenes de caucho y se desliza al entrar en actividad).

Para eliminar más rápido el calor resultante de la presión de las pastillas sobre las ruedas –en condiciones extremas de frenado se puede alcanzar los 800 °C de temperatura–, los discos pueden tener espacios huecos entre sus caras (se los llama ventilados). Los frenos de un vehículo pierden efectividad debido al sobrecalentamiento de los elementos que están en contacto (discos y pastillas), el calentamiento excesivo de los frenos disminuye la adherencia del material empleado en las balatas.



Figura 1.4 Prueba de banco



Figura 1.5 Puntos de concentración de calor

La Fig. 1.4 muestra un evento de frenado súbito en prueba de banco y la Fig. 1.5 muestra los puntos donde se concentro el calor generado.

Los discos ventilados mantienen más baja la temperatura durante la frenada y son más eficientes. Debido a la distribución de peso y su geometría, un auto debe frenar más adelante que atrás, Es por eso que al frente se encuentran los frenos de mayor efectividad y robustez³.

1.4. Ventajas que representan los frenos de disco

La velocidad promedio de los vehículos está aumentando. Debido a la creciente relación potencia / peso, mejoras en la aerodinámica y el grado de desarrollo de los neumáticos, generando una menor resistencia al rodar. Se sabe que, incluso con un pequeño aumento en la velocidad promedio, resulta en un gran aumento en el esfuerzo de frenado debido a que la energía cinética es función del cuadrado de la velocidad.

Las principales ventajas son de los frenos a disco son:

El equilibrio de las presiones en ambas caras del disco suprime toda reacción sobre el eje (delantero o trasero) del vehículo; además, estas presiones axiales no producen deformaciones de la superficie de frenado.

La dilatación transversal bajo el efecto del aumento de temperatura tiende a disminuir el juego entre disco y pastillas; de todas formas, esta dilatación es más pequeña que la radial de los frenos de tambor, lo que facilita el reglaje y simplifica los dispositivos de reglaje automático. El disco se encuentra al aire libre y por ello, su refrigeración está asegurada y no pierden eficacia al sumergirlos en agua

Las situaciones que evidencian fallos en el sistema de frenos son:

- El aumento de la distancia de frenado.
- El aumento del recorrido del pedal de freno.
- Ruidos o vibraciones al momento de frenar.
- Disminución en el nivel del líquido de frenos.

CAPITULO 2. DISCO DE FRENO

2. Disco de freno

Los discos de freno interactúan con las pastillas para frenar el vehículo como se observa en la Fig. 2.1, debido a que el disco gira junto con las ruedas. Ese rozamiento entre el disco y la pastilla produce la transformación de energía cinética en energía calorífica que se disipa en el ambiente, provocando una reducción de la velocidad.



Figura 2.1 Disco de freno

Los discos de freno no solo deben producir la transformación de energía sino que además deben de conseguir disipar lo más rápidamente posible a la atmosfera el calor producido, debido a que las altas temperaturas presentes durante el frenado podrían llegar a colapsar el sistema.

Un punto importante a considerar en los discos, es el material seleccionado para su fabricación. La fundición de hierro gris de grafito laminar, garantiza una estabilidad de las prestaciones durante el periodo de vida de los discos⁴.

Las características mecánicas de la fundición de los discos la podemos ver la Tabla 2.

Propiedades mecánicas	Valores
Resistencia a la Tracción	240 N/mm ²
Dureza	170 - 250 HB

Tabla 2 Propiedades mecánicas de un Disco de Freno.

2.1. Composición química

Por motivos de estabilidad en las prestaciones de los disco de freno, el costo de la materia prima y de facilidad de fabricación, la fundición gris resulta ser el material indicado. El *hierro gris* por sus buenas propiedades mecánicas, térmicas y tecnológicas de fabricación que presentan, tiene una mayor ventaja sobre otros materiales. Se puede constatar que para cada tipo de vehículos y de disco se necesitaría un tipo de fundición con características especiales. Para modificar las prestaciones de un hierro se interviene en dos aspectos: *la composición química y el tratamiento de inoculación durante la colada*.

La composición química del material de los discos es una fundición gris de grafito laminar, que contiene entre un 92% y un 93% de hierro. Al hierro que contiene otros elementos además del C, Si, Mn, P y S, se le *denomina hierro aleado*. En la figura 2.1 podemos ver el porcentaje de los diferentes elementos aleantes con el hierro⁵.

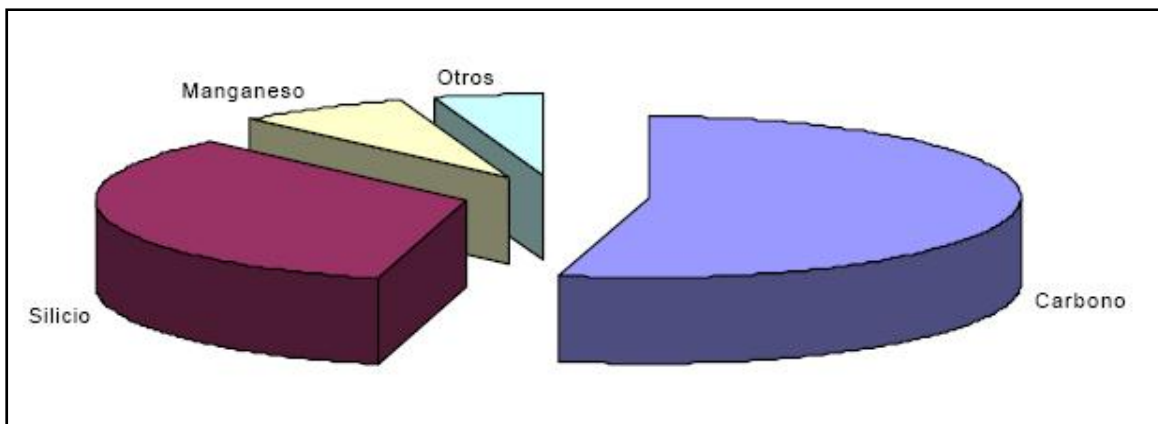


Figura. 2.2 Elementos químicos de un disco de freno (Resto de componentes excluyendo el 92% de hierro).

Los hierros normalmente se alean con los siguientes elementos: Cr, Ni, Mo, Sn, Cu, V, Ti y Al. La composición química especificada para un disco de freno puede variar, ya que está en función del diseño del disco a fabricar (tamaño, espesores y tipo de automóvil). Los elementos aleantes tales como: Cr, Cu, Ni, Sn, Mo y otros elementos pueden ser empleados para obtener propiedades mecánicas y físicas específicas ó requerimientos estructurales especiales para condiciones de servicio particulares⁶.

2.2. Geometría

La geometría de los discos de frenos consta de una pista de frenaje perfectamente plana (Fig. 2.2), en algunos casos con modificaciones (aletas) con la finalidad de una mejor disipación del calor y desempeño en el disco. A continuación se describen las partes que componen un diseño de un disco.

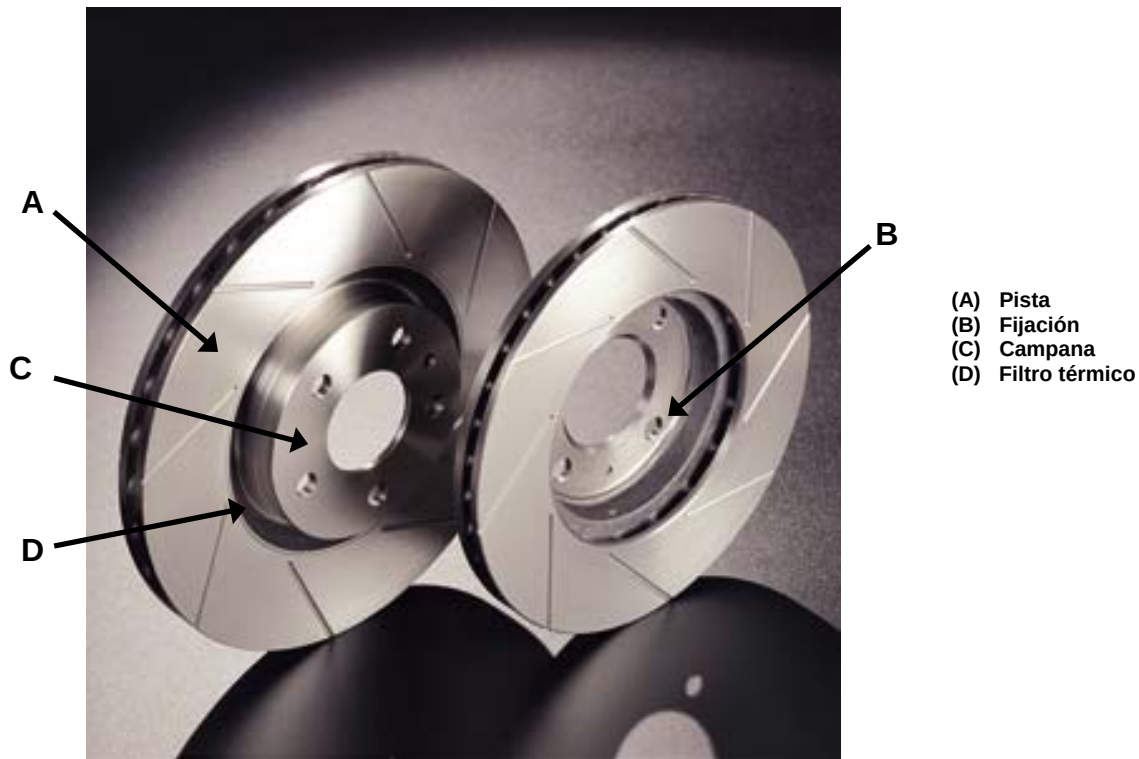


Figura 2.3 Geometría del disco de freno.

La pista: Superficie la cual interacciona con las pastilla para producir la acción de fricción entre ambos elementos. Su dimensión está en función de su potencia de disipación, la cual es cercana al valor de 250 W/cm^2 , este valor puede variar en función de la geometría del disco. Si el disco es ventilado el valor de la potencia de disipación puede alcanzar un valor de 750 W/cm^2 .

Por encima de dichos valores, pueden aparecer daños en el disco, tales como deformaciones geométricas, grietas, depósitos de material de fricción u otros que dañarían el disco de forma irreversible.

Fijación: La fijación de los discos está situada en la parte central del mismo a través de un cierto número de barrenos que permiten el paso de los pernos del rodamiento del vehículo para permitir el anclaje de la rueda.

La campana: La campana es el cilindro que une la pista con la fijación del disco.

El filtro térmico: Es un canal mecanizado (figura 2.3), que separa la pista de la fijación, para reducir el flujo de calor que pasa de la pista hacía la campana. Con este tipo de canales se evita el calentamiento excesivo del neumático.⁷



Figura 2.4 Filtro térmico

Como ya se menciona uno de los principales objetivos del disco es disipar a la atmósfera de forma rápida y eficiente el calor producto del frenado para mantener una temperatura de operación en el disco dentro de valores razonables con el fin de mantener su integridad mecánica, la forma más sencilla es realizar una circulación de aire en contacto con el disco.

Los discos deben de desempeñar dos funciones principales: mover el aire a su alrededor como lo haría un ventilador, y transmitir su energía a la atmósfera como lo hace un radiador.

La geometría del disco hace que sea posible la circulación del aire desde la campana hacia el exterior de la pista, el disco ventilado permite una mayor disipación térmica que un disco macizo en el mismo espacio.⁸

El disco ventilado está formado por dos pistas separadas por aletas generalmente rectas en su interior. Estas aletas (Fig. 2.5) garantizan la cohesión del disco permitiendo el paso de aire por su interior. Debido a estas aletas, el enfriamiento del disco no solo se produce en la superficie exterior del disco sino que además se produce su enfriamiento por el interior. Este intercambio de energía depende de la forma y la orientación de las aletas. En la Fig. 2.6 se muestra la distribución de las aletas rectas sobre el disco de freno.

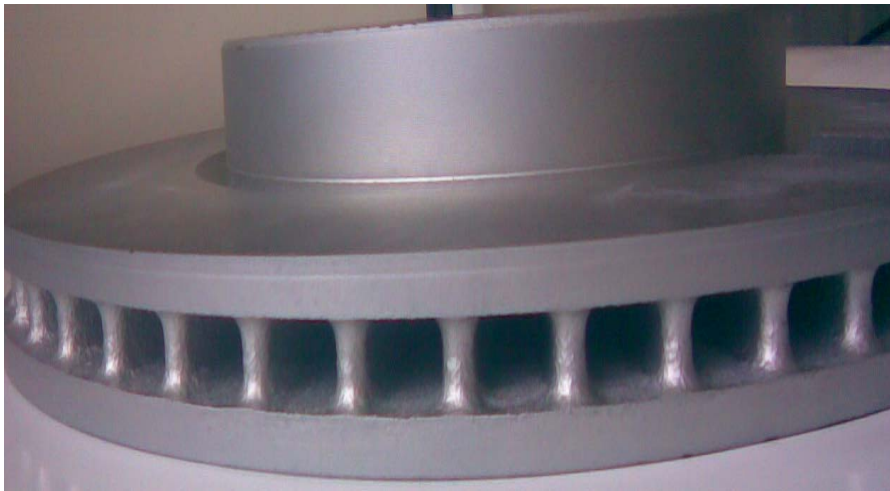


Figura. 2.5 Pistas separadas por aletas

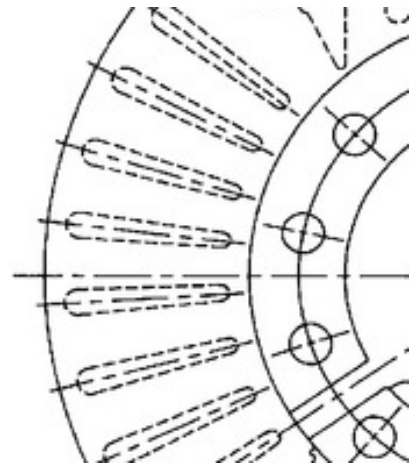


Figura. 2.6 Aletas rectas

Una de las mejoras más significativas encaminada a la reducción de la temperatura que alcanza la campana del disco, se consigue mediante una ranura en forma de canal en la zona situada entre la campana y la pista del disco (Fig. 2.4), lo que antes se ha denominado filtro térmico.

Gracias a este filtro térmico el calor que se transfiere a la llanta es menor, además se consigue una reducción en la deformación del disco al reducirse la temperatura de la campana y sus consiguientes tensiones térmicas.⁹

2.3. Esfuerzos mecánicos y térmicos

Esfuerzo mecánico. Cuando el vehículo está en marcha, el disco está sometido bajo cierto esfuerzo mecánico. El efecto centrífugo (Fig. 2.7) debido a la rotación del disco se crea un esfuerzo de tracción. Al frenar, en el disco se presentan dos nuevas fuerzas, una fuerza de compresión, debido a la presión ejercida por las pastillas perpendicularmente a la superficie del disco; esta fuerza crea en el disco un esfuerzo de compresión.

La fuerza del frenado debido a la fricción la pastilla contra la superficie del disco se traduce en un esfuerzo de tracción del orden de 10-20 MPa, que hay que comparar con la resistencia a la tracción de la fundición, que equivale a unos 200 MPa. Después de largos periodos de funcionamiento el disco puede sufrir microfisuraciones las cuales propiciarían la ruptura del disco, este tipo de esfuerzo repetido se llama fatiga. También el disco puede sufrir flexiones que pueden producirse al frenar en las curvas y el esfuerzo dinámico que presenta cuando vibra el disco¹⁰.

Ejemplos de estrés mecánico al que está sometido el disco de freno en un automóvil:

Peso del vehículo a plena carga 1560 kg
 Distribución delantera/trasera 56%
 Radio bajo carga 27.5 cm
 Diámetro del disco 238 mm
 Superficie de la pastilla 35 cm²
 Velocidad del coche 150 km/h
 Deceleración al frenar 0.6 g
 La presión del disco:

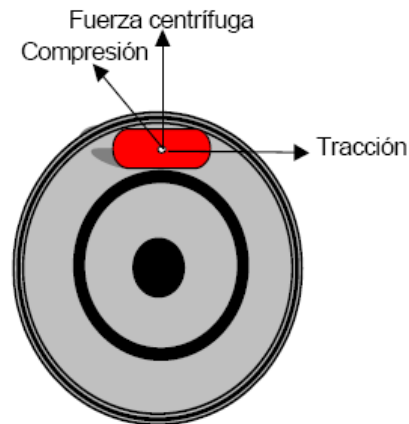


Figura 2.7 Fuerzas en el disco de freno

Presión debido a la fuerza centrífuga	0.73N/mm ²
Fuerza de compresión por pastilla	7193 N
Esfuerzo de compresión	2205 N/mm ²
Fuerza frenante en el centro del empuje	7182 N
Esfuerzo de tracción debida a la fricción	122N/mm ²

Esfuerzo térmico. La transformación de la energía cinética del vehículo al frenar se encuentra en forma de calor generado por la acción de frenar. El calor se genera al entrar en contacto dos superficies: la pastilla y el disco, el reparto de los caudales de calor depende de las características Físico-Químicas de los dos materiales, relativamente constantes por lo que concierne a las fundiciones. La Fig. 2.8 muestra una imagen térmica de la concentración del calor sobre la superficie de la pista de frenado.

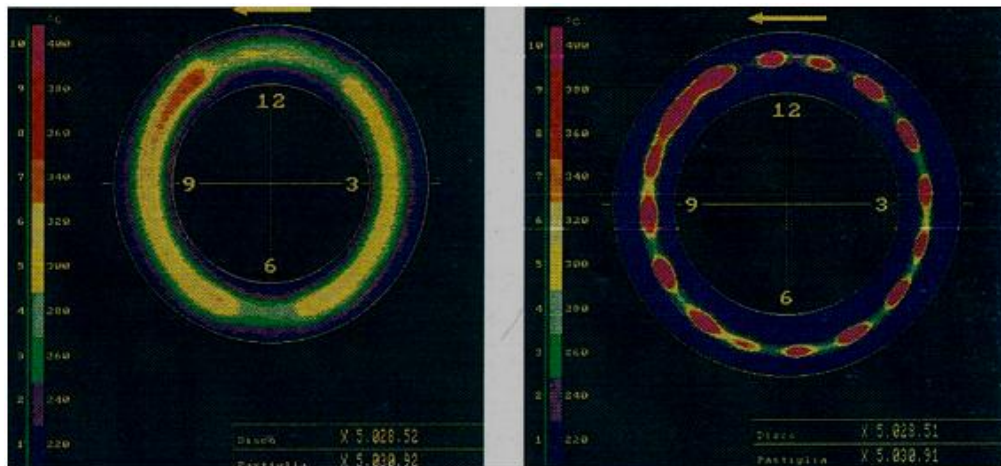


Figura 2.8 Concentración de calor



Figura 2.9 Superficie azulada y pequeñas fisuras en disco

Más del 80% del calor generado termina en los discos, por eso es preciso favorecer el enfriamiento del disco, se puede aumentar la superficie de intercambio, como ocurre en los discos ventilados, también se puede incrementar el caudal de aire, mejorando el rendimiento a través de la conformación de las aletas. El excesivo aumento de la temperatura en los discos también tiene numerosas consecuencias, puede ocurrir una transformación local de la fundición en cementita de gran dureza esta se manifiesta con puntos azulados en la superficie, o una deformación permanente del disco. Por conducción, el calor se traslada hacia la campana y en este caso la pista del disco sufre deformaciones. En ocasiones se pueden presentar pequeñas fisuras en la pista de frenado del disco¹¹.

CAPITULO 3 HIERRO GRIS

3. Características del hierro gris

La fabricación de piezas en fundición de hierro ocupa un campo muy extenso de la industria. Estos materiales son aleaciones de Hierro-Carbono con altos porcentajes y que se denominan fundiciones por ser este el procedimiento industrial de fabricación de las mismas. El mayor porcentaje de carbono reduce la temperatura de fusión de los hierros en comparación con los aceros en un 20% y además se logra una mayor fluidez del material líquido, lo que permite el llenado de piezas de espesores menores y de formas complicadas, es decir, tienen una mejor colabilidad¹².

Por otra parte, la menor temperatura de fusión permite que la interacción metal–molde sea menos agresiva y en consecuencia se pueden obtener piezas más sanas.

Su bajo costo, y esta excelente colabilidad, han dado lugar a un extenso desarrollo de estas aleaciones en aplicaciones como: bloques de motor, camisas de pistón, engranajes, cuerpos de válvula, piezas de automóvil, disco de freno, y otras muchas piezas para maquinaria.¹³

Las propiedades mecánicas no son el producto de formulaciones de composición química más o menos sofisticada. La técnica de fabricación es tan importante y más que la adición de los elementos de aleación, o mejor dicho, la combinación de ambos aspectos es el camino para lograr los mejores resultados¹⁴.

La fundición gris es un material metálico compuesto estructuralmente de un constituyente matriz y de un material disperso. La matriz puede considerarse que es acero, sea éste de tipo ferrítico, perlítico o ferrito-perlítico. El material disperso es la parte del carbono que no está disuelto en el acero y que toma la forma de grafito. Por tanto, el comportamiento mecánico de una fundición gris resulta parecido al de un acero con numerosas micro fisuras taponadas por grafito¹⁵.

Este grafito aparece como pequeñas partículas o láminas insertas en la matriz metálica. Si la estructura matriz es de tipo ferrítico, será mayor la cantidad de grafito, puesto que la ferrita apenas disuelve carbono. Si por el contrario es de tipo perlítico entonces será menor la cantidad de carbono libre puesto que habrá una parte del Carbono que se une a otra de Hierro formando la cementita que constituye el conjunto perlítico. La cantidad, la forma y el tamaño del grafito, y por otra parte el tipo de estructura matriz que resulte serán los elementos determinantes de las propiedades que tenga esa fundición¹⁶.

El grafito presente en la estructura hace que las fundiciones grises tengan alta maquinabilidad y buena resistencia al desgaste. El grafito proporciona la cualidad de auto lubricantes y a su vez amortigua las vibraciones. Además se obtiene una buena conductividad térmica y buena resistencia a temperaturas altas. Por el contrario, tendremos

una baja tenacidad puesto que esas láminas de grafito son incipientes micro fisuras, como dijimos anteriormente.¹⁷

Se denominan así a las fundiciones que solidifican y enfrían según el diagrama hierro-carbono. Una fundición sigue este diagrama en condiciones de enfriamiento lento.

En la práctica se le añade elementos grafitizantes como el Si, Al, Ni, Cu. Estos elementos actúan: 1) diluyendo las agrupaciones atómicas de Fe y C impidiendo su solidificación conjunta; 2) Afinidad, el Fe tiene más afinidad por estos elementos que por el C y éste solidifica en forma de grafito.

Para un contenido medio de Si constante, las modificaciones en la velocidad de enfriamiento hacen que varíe la estructura final de la fundición gris.¹⁸

Las fundiciones se pueden clasificar como fundiciones eutécticas, cuando el contenido en carbono es del 4.3 % en peso, fundiciones hipoeutécticas cuando el contenido en carbono es menor y fundiciones hipereutécticas cuando el contenido en carbono es mayor. Según el diagrama de fases, las fundiciones tienen temperaturas de fusión entre 1150 y 1300 °C, más baja en comparación con los aceros (del orden de 1500 °C). Por tanto funden y se moldean con mayor facilidad.¹⁹

Sin embargo, las fundiciones se clasifican más por el estado en que se encuentra el carbono. Ya se ha comentado que la cementita es metaestable y descompone para dar ferrita y grafito. En enfriamiento lento y la presencia de algunos elementos (principalmente el silicio con una concentración superior al 1 %) favorecen este proceso y la presencia de otros elementos y los enfriamientos rápidos lo impiden.²⁰

Las propiedades mecánicas de las fundiciones dependen de la composición y del tratamiento térmico. Los tipos más comunes de fundiciones son: gris, esferoidal, blanca y maleable que se verán posteriormente.

La fundición gris tiene un contenido en carbono entre 2.5 y 4.0 % y de silicio entre 1 y 3 %. El grafito suele aparecer como escamas dentro de una matriz de ferrita o perlita, la microestructura se observa en la figura 3.0. El nombre se debe al color de una superficie fracturada.²¹



Figura 3.1 Microestructura fundición gris

La resistencia de la fundición gris depende casi exclusivamente de la matriz en que esta incrustado el grafito. Esta matriz depende de la condición de la cementita eutectoide. Si la rapidez de enfriamiento y composición son tales que esta cementita grafitiza, entonces la matriz será completamente ferrítica, por el contrario si persiste la cementita eutectoide, la matriz será totalmente perlítica²².

Desde un punto de vista mecánico las fundiciones grises son comparativamente frágiles y poco resistentes a la tracción. La resistencia y la ductilidad a los esfuerzos de compresión son muy superiores. Estas fundiciones amortiguan la energía vibracional de forma mucho más efectiva que los aceros. Así los equipos que vibran mucho se suelen construir de esta aleación.²³

A la temperatura de colada tienen mucha fluidez por lo que permite moldear piezas de forma muy complicadas. Además, la fundición gris es uno de los materiales metálicos más baratos. Se utiliza en bloque de motores, tambores de freno, cilindros y pistones de motores.²⁴

3.1. Hierro Hipereutético

Hierro hipereutético, el contenido de carbono es mayor del 4.3%. Este tipo de hierro permite mantener la resistencia de los hierros hipoeutéticos, pero los carburos secundarios que se obtienen después del temple, debido al elevado contenido de carbono, aumentan considerablemente la dureza de la base metalográfica y por lo tanto incrementan la resistencia al desgaste.

Este tipo de hierros presenta una alta capacidad de amortiguamiento (damping), alta conductividad térmica, para disipar el calor que se produce durante la fricción al aplicar los frenos a alta velocidad y el mecanismo de desgaste que prevalece en este proceso no es abrasivo.²⁵

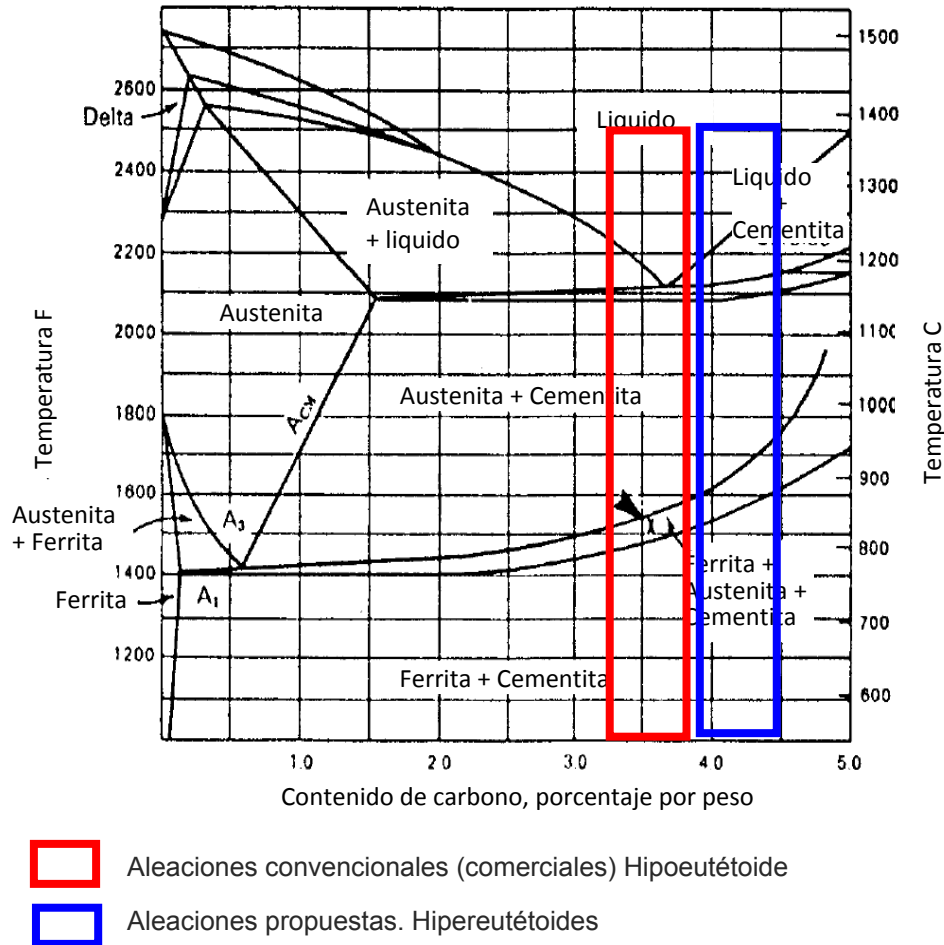


Figura 3.2 Diagrama Hierro-Carbono²⁶

La Fig. 3.2 muestra el diagrama de fase Hierro-Carbono e indica donde se encuentran las aleaciones hipoeutectoides e hipereutectoides de acuerdo al contenido de carbono

3.2. Influencia de los elementos grafitizantes

La influencia de los elementos de aleación está relacionada fundamentalmente con el control de la transformación de la austenita.

El carbono es sin lugar a dudas, después del hierro, el elemento más importante; se le puede encontrar combinado con el hierro (carbono combinado) en forma de carburo (cementita con 6,67% C) o en el estado libre de grafito (carbono libre o grafitico).²⁷

Entre los factores que influyen en que el carbono se encuentre en una u otra forma están la velocidad de enfriamiento y la presencia de elementos grafitizantes. Un enfriamiento lento y la presencia de silicio, níquel, cobre, etc.; facilitan la formación de grafito. La forma, cantidad, tamaño y distribución de las láminas de grafito deben ser controladas cuando se requiere obtener fundiciones de calidad.²⁸

El Silicio (Si) al ser un enérgico grafitizador, si no es balanceado por otros elementos formadores de carburo, el carbono primario precipita como hojuelas de grafito. Una vez que se constituye el carbono primario como grafito su forma ya no puede alterarse. Estas hojuelas rompen la continuidad de la matriz y generan un efecto concentrador de esfuerzos, lo cual explica la baja resistencia y ductilidad de la fundición gris.²⁹

El contenido de Silicio afecta la formación de carburos, dando como resultado las distintas matrices de la fundición gris. En la región media hay suficiente silicio como para provocar la grafitización de todos los carburos excepto la cementita eutectoide, de manera que se obtiene matriz perlítica y hojuelas de grafito. Se requiere de un cuidadoso control del contenido de silicio y de la velocidad de enfriamiento para grafitizar la cementita eutéctica y proeutectoide pero no la eutectoide a fin de lograr una matriz totalmente perlítica de alta resistencia.³⁰

Cuando el carbono equivalente (CE) es igual a 4,3% el modo de solidificación es esencialmente 100% eutéctico. Se da una cierta relación entre el valor del CE y la resistencia que se puede estimar en una aleación de hierro concreta, como se ve en el gráfico adjunto. También se ve la influencia de la velocidad de enfriamiento bajo la forma de los distintos espesores de las piezas³¹.

La cantidad de silicio presente será por tanto determinante del tipo de estructura que queremos obtener. La definición de la cantidad será un balance del Carbono equivalente resultante y del espesor de las piezas. El efecto grafitizador del Silicio se puede explicar observando cómo modifica las temperaturas eutécticas en los diagramas estable y metaestable. La separación de ambas temperaturas da lugar a que la curva de solidificación típica de las aleaciones hipoeutécticas permita completar la solidificación sin que se haya atravesado la línea eutéctica metaestable y así obtener una estructura ausente de cementita.³²

Es evidente que la velocidad de enfriamiento juega un papel fundamental en este proceso, y eso puede llevar al fundidor a variar el contenido de Silicio en el caso de tener espesores delgados o bien a utilizar otras técnicas para minimizar las velocidades en esos puntos.

El silicio propicia que la austenita se transforme en Ferrita y Grafito, evitando así la transformación natural de la Austenita en Perlita –ferrita y cementita-, es decir, nuevamente se tiene el compromiso entre la transformación estable y metaestable. También en este caso la velocidad de enfriamiento juega un papel fundamental en los productos de esta transformación: enfriamiento lento da lugar a una estructura de matriz ferrítica y por consiguiente suave, enfriamiento rápido dará lugar a una estructura perlítica y de mayor resistencia.³³

Los aleantes se añaden para mejorar determinadas propiedades específicas, como resistencia al desgaste, la corrosión o la temperatura de cada tipo de fundición. El efecto general de todos ellos es el de acelerar o retardar la grafitización, los más comunes son Cromo, níquel, Cobre, Molibdeno y Vanadio.³⁴

El Cobre tiene efecto grafitizador leve, disocia la cementita maciza haciendo menos frágil la matriz, pero sobre todo aumenta la resistencia a la corrosión. Comúnmente se le utiliza para fundiciones maleables especiales.

El níquel es grafitizador, retarda la transformación de la austenita y estabiliza la perlita permitiendo lograr matrices totalmente perlíticas. Se lo utiliza en combinación con el Cromo en la fundición Blanca para lograr una matriz combinada de carburos, martensita y austenita retenida, que logran una resistencia a la abrasión y dureza superiores.³⁵

3.3. Influencia del grafito sobre las propiedades generales de los hierros

El tamaño y distribución del grafito influyen drásticamente sobre las propiedades de la fundición. Las hojuelas interrumpen la continuidad de la matriz, reduciendo la resistencia y ductilidad. Las hojuelas pequeñas son menos dañinas por lo que se prefieren.

El tamaño está normalizado y se determina por comparación con foto micrografías de muestra.

- La muestra pulida se observa a 100x.
- El enfriamiento lento de la fundición favorece la grafitización pero también la formación de grandes cristales de austenita primaria, dando como resultado pocas hojuelas grandes y gruesas.
- El exceso de carbono incrementa la formación de eutéctico y de grafito, lo que puede debilitar la matriz de la fundición en mayor proporción que una hojuela de menor tamaño.
- El silicio en exceso incrementa la formación de eutéctico y por lo tanto da hojuelas más finas y pequeñas. Pero también es un enérgico grafitizador, por lo tanto tenderá a formar una matriz ferrítica de baja resistencia mecánica.
- El mejor método para reducir el tamaño y distribución del grafito es mediante el agregado de inoculantes. Estos agentes inoculantes como Calcio, Aluminio, titanio, zirconio, carburo de silicio, etc., causan la nucleación de la austenita primaria originando muchos pequeños granos, lo cual reduce el tamaño y mejora la distribución del grafito.³⁶

La forma de las hojuelas se clasifica en 5 tipos (A,B,C,D,E) ver apéndice A1. El tipo D y E resultan de la grafitización de una estructura eutéctica típica de hierros de alta pureza o en fundiciones enfriadas rápidamente. Si bien las hojuelas son pequeñas, la conformación interdendrítica de las mismas debilita la estructura de manera que son indeseables. Con menor velocidad de enfriamiento no ocurren.

Las pocas hojuelas grandes y rectas del tipo C indican que el hierro es hipereutéctico en contenido de carbono. El silicio y otros elementos de aleación reducen este efecto, en general estas estructuras no son deseables.

Las hojuelas tipo B son comunes solo en la región intermedia de una fundición colada en molde frío, conocida como manchada, donde la rapidez de enfriamiento es la máxima que permite el proceso de grafitización.

El tipo de hojuela más deseable es el A, que resulta de una estructura eutéctica completamente separada. En este caso el tamaño pequeño de las mismas está determinado por el de los cristales de austenita primaria alrededor del cual se forman.³⁷

Las características mecánicas de una fundición gris son las siguientes:

- Dureza Brinell entre 156 y 302
- Resistencia a la tracción entre 150 y 430 MPa
- Resistencia a la compresión entre 570 y 1,3 GPa

CAPITULO 4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4. Diseño experimental

En este capítulo se explicara el procedimiento realizado para llevar a cabo el diseño de las aleaciones, selección del proceso de moldeo, fundición y preparación de la carga metálica. Además de obtener la caracterización de los discos de freno fabricados experimentalmente.

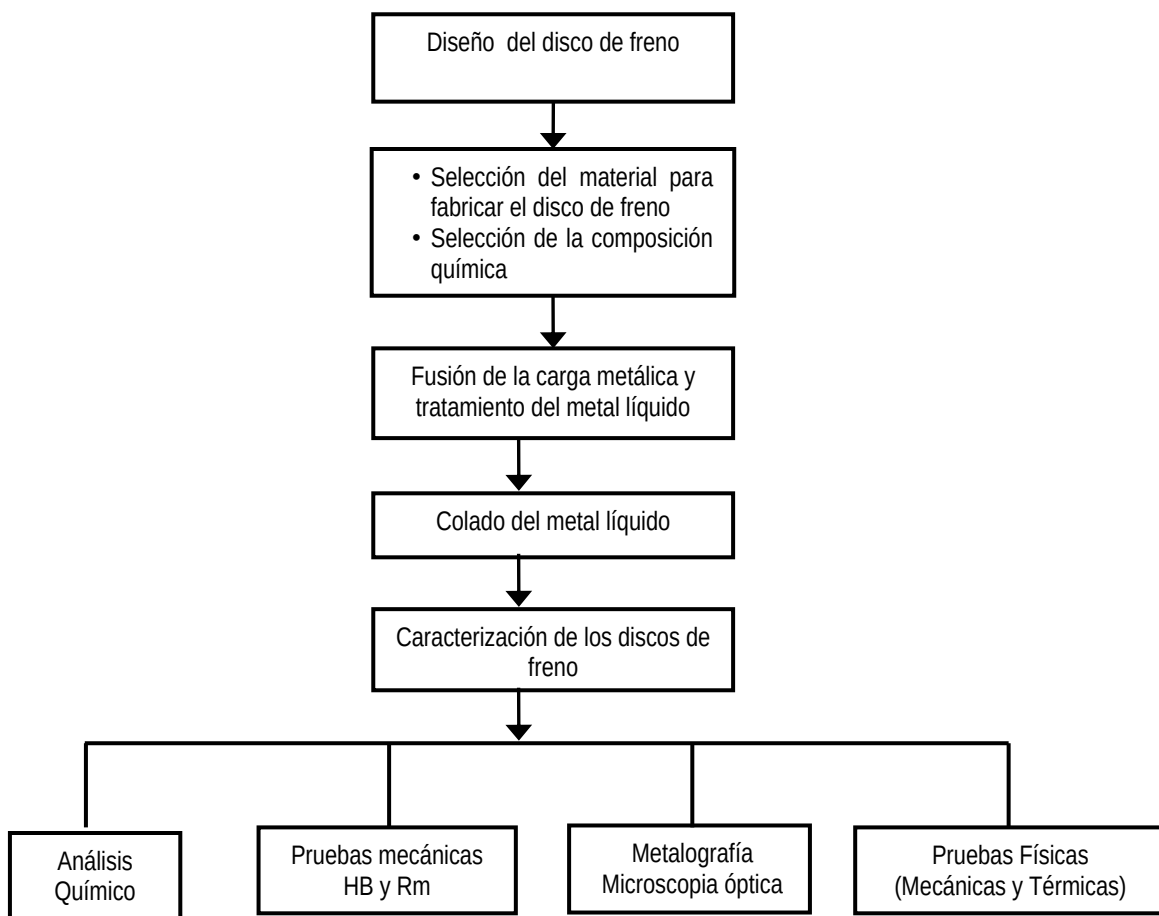


Figura 4.1 Metodología experimental

4.1. Diseño de las aleaciones

La primera etapa experimental de este proyecto de tesis comienza con el diseño de las aleaciones de hierro gris hipereutécticas con diferentes contenidos de elementos de aleación y grafitizantes. El conocimiento de las propiedades físicas tales como las térmicas y las mecánicas, es un importante punto para el diseño del material de los discos de freno. El rango de temperaturas de trabajo en los discos es muy amplio y ésta es la razón para conocer las variaciones de las propiedades frente a la temperatura. Propiedades como la conductividad térmica, calor específico, expansión térmica y resistencia a la tracción, etc., cambian significativamente sus valores con la temperatura.³⁸

Los estándares equivalentes que describen los requerimientos para cinco grados diferentes de hierros grises fundidos para aplicaciones automotrices son SAE J431 y ASTM A159.³⁹

Durante esta fase de diseño es necesario también seleccionar que tipo de fundición gris hipereutéctica es la mejor opción. Actualmente, es común un alto contenido de carbono por sus buenas características termo-mecánicas, aunque es posible emplear un contenido medio de carbono. La elección óptima del material es un paso muy importante dada su influencia en el comportamiento del disco durante su vida útil.⁴⁰

4.2. Selección del proceso de moldeo y fundición

4.2.1. Técnicas de moldeo, preparación de la carga metálica, fundición y colada

El proceso más comúnmente empleado para fabricar masivamente este componente es la fundición en molde de arena. Ver la figura 4.2 donde se puede observar la colada de un disco de freno.⁴¹

El proceso de la colada es muy importante para el comportamiento posterior del disco, ya que los defectos que podrían generarse en esta etapa tales como: porosidad, sopladuras, escoria entrampada, etc., podrían alterar las propiedades termo-mecánicas y el buen desempeño del componente en servicio.⁴²

Algunos aspectos tales como las variables de la colada, velocidades de refrigeración, contenido de inoculantes o la microestructura de la fundición tienen una influencia importante sobre la dureza, el desgaste, la ondulación superficial o el agrietamiento térmico, entre otros.⁴³

En la Fig. 4.2 se muestra el proceso de colada del material al molde, en la Fig. 4.3 muestra el interior de un molde de función de un disco de freno.



Figura 4.2 Proceso de colada del material



Figura 4.3 Molde de fundición

En el presente trabajo el proceso de fabricación del disco de freno fue en moldeo de arena en verde tipo horizontal. En el laboratorio de fundición se empleó el siguiente equipo: un horno de inducción sin núcleo con capacidad de 10 kg. La chatarra utilizada fue acero 1018 y arrabio tipo sorel, la relación de cargas empleada fue 60:40.

En el área de moldeo se utilizó arena sílica con un AFS de 58% mezclada con bentonita, carbón marino y agua. El colado de la aleación fue en un molde de arena en verde con la forma de un disco de freno cuyo objetivo fue que la geometría, la forma del colado y el tratamiento del hierro (inoculación y velocidad de enfriamiento) no alteraran la microestructura (las fases presentes y la morfología del grafito) a obtener ya que estos parámetros son los que gobiernan el tipo de hierro a obtenerse.

Las temperaturas de proceso fueron las siguientes: temperatura de vaciado fue de 1480/1500 °C y la temperatura de colado de 1380/1410 °C. Como inoculante se usó Inoculin 90 marca FOSECO, el tiempo de desmoldeo fue de 23 minutos para todas las pruebas realizadas.⁴⁴

4.3. Caracterización general de los discos de freno diseñados y fabricados

Cada uno de los discos generados en laboratorio, fueron sometidos a diversas pruebas destructivas y no destructivas, con la finalidad de ser inicialmente caracterizados, evaluados en su desempeño y validados. A continuación se describen los ensayos que fueron efectuados bajo las siguientes técnicas de caracterización:

- Análisis químico
- Análisis micro estructural
- Ensaye a la tensión, ensaye a la dureza Brinell HB, ensaye al desgaste
- Líquidos penetrantes
- Conductividad térmica por método directo

4.3.1 Análisis Químico

El método analítico utilizado para el análisis químico en este trabajo fue la espectroscopia por emisión de chispa (Fig. 4.4). Este método consiste en hacer pasar una corriente que provoca una chispa entre un electrodo conductor y la pieza a analizar.⁴⁵

Teniendo en cuenta la distancia y la dimensión del electrodo, la superficie que se analiza es un cilindro de unos 4mm de diámetro que se obtiene de la sección de la pista de frenado del disco mostrado en la Fig. 4.5. Para conseguir una medición representativa, se provocan chispas en varios puntos. Debido al calor desprendido y a la temperatura conseguida localmente, los metales contenidos se volatilizan en un plasma. Entonces emiten una luz cuya longitud de onda corresponde a su estructura atómica y cuya intensidad es proporcional a su concentración. El análisis de precisión del espectro de la luz emitida proporciona la composición química de la fundición y el resultado puede compararse con tablas de referencia.⁴⁶

Para el caso de carbono y azufre se determinaron en un equipo LECO.

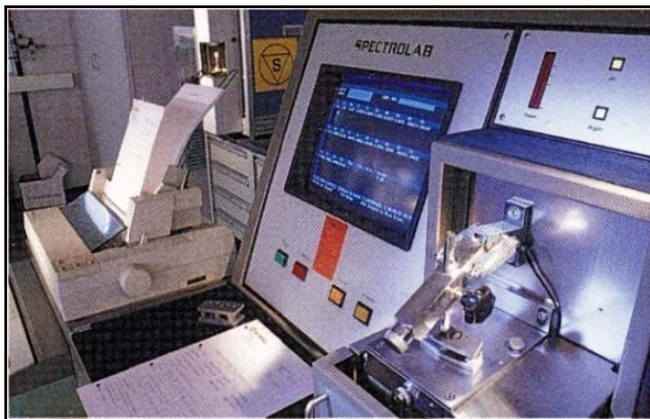


Figura 4.4 Espectrómetro por emisión o de chispa.

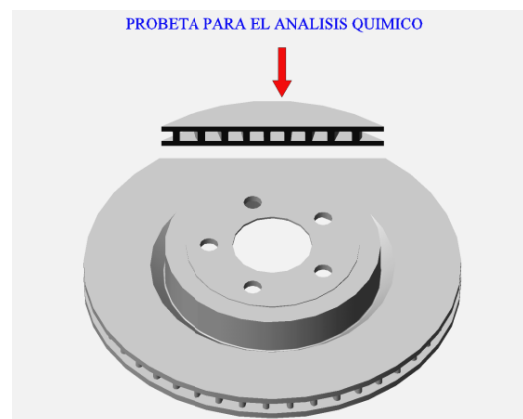


Figura 4.5 Probeta para análisis químico.

4.3.2. Análisis Micro estructural

La metodología empleada para efectuar el análisis metalográfico se efectuó de acuerdo a las descritas en las normas ASTM A247-47 y 67 para hierros.⁴⁷

Las probetas para el análisis metalográfico fueron extraídas de la pista de frenado de los discos (fig. 4.6). El procedimiento que se realizó para el análisis metalográfico, consta de pulir las probetas hasta un terminado espejo, utilizando lijas de carburo de silicio con una malla desde 80 hasta 2000, posteriormente se realizó un pulido en cada probeta con paño y pasta de diamante, con la finalidad de obtener mejores resultados, para poder observar la morfología gráfica en un microscopio óptico se analizaron con un aumento de 100X, y para determinar la composición de las fases (Ferrita y Perlita) que componen cada disco, las probetas fueron sometidas a un ataque químico con Nital al 2% (1-5 ml. de ácido nítrico y

100 ml. de alcohol etílico) aproximadamente durante 12 – 15 segundos (Fig. 4.6), y observadas en el microscopio óptico a 400X.⁴⁸



Figura 4.6 Probete para análisis metalográfico.

Cada probeta fue observada a través de un analizador de imágenes marca IMAGE PRO PLUS THE PROVEN SOLUTIONS.



Figura 4.7 Ataque químico.

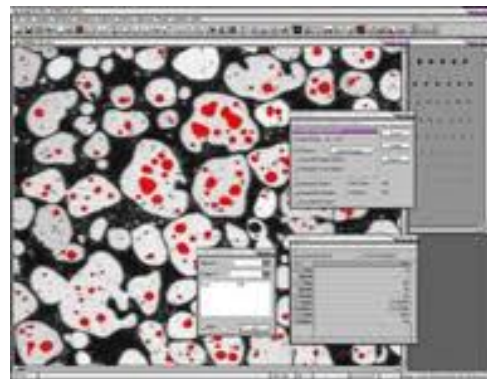


Figura.4.8 Analizador de imágenes.

En la tabla 4 se resumen los detalles de los análisis metalográficos: Microestructura, morfología gráfica y %CE, obtenidos de las probetas de cada uno de los discos ensayados.

Prueba No	CE (%)	Dureza HB	Rt (Mpa)	Rc (0.2) (Mpa)	Microestructura			Morfología gráfica	
					Perlita	Ferrita	Carburos	Clase	Tamaño
AC1	4,312	198,6	306,33	233,4	> 98 %	< 2%	< 1	A	3, 4, 5
AC2	4,33	152	149,48	-	> 98 %	< 2%	< 1	A	3, 4, 5
AC3	4,354	213,3	261,71	219,83	> 98 %	< 2%	< 1	A	3, 4, 5
AC4	4,372	185,6	216,76	188,75	> 98 %	< 2%	< 1	A	3, 4, 5
AC5	4,426	186,4	201,4	190,98	> 98 %	< 2%	< 1	A	3, 4, 5
AC6	4,485	162,4	176,82	-	85/90%	10 / 15 %	< 1	50%A+50%C	1, 2, 3
AC7	4,508	179,3	184,7	-	85/90%	10 / 15 %	< 1	50%A+50%C	1, 2, 3

Tabla 4 Resultados de análisis metalográficos y pruebas mecánicas

4.3.3. Pruebas mecánicas

La finalidad de ensayar mecánicamente a los discos es para obtener los valores en la resistencia mecánica, esfuerzo de cedencia, % de elongación, modulo de Young y dureza. Dichos parámetros funcionan como criterios de diseño y selección de un material para discos de freno de acuerdo a la norma SAE J431 AUTOMOTIVE GRAY IRON CASTING.⁴⁹

a) Ensaye a la tensión

Los ensayos se efectuaron en una máquina para ensayo a la tensión marca SHIMADZU con una capacidad de 100 kN, la norma empleada fue ASTM E8M. Se obtuvieron 3 probetas por disco de la pista de frenado (fig. 4.10a). En la Fig. 4.9 muestra las probetas para el ensayo a tensión y de que sección del disco de freno fueron obtenidas.

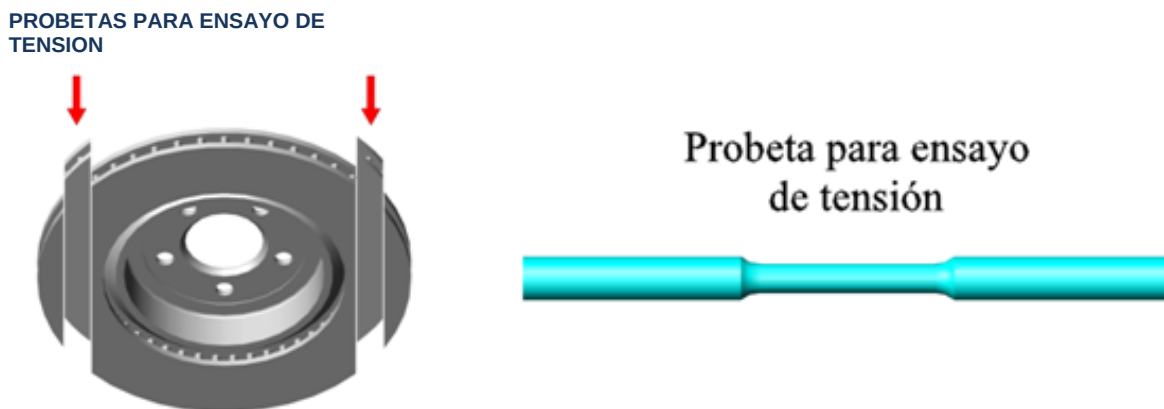


Figura 4.9 Extracción de las probetas para el ensayo de tensión.

El ensaye se realizado mediante el uso de dos mordazas (Fig. 4.10b) que sostienen a la probeta verticalmente presionando mecánicamente las mordazas con la probeta y aplicando un rango de carga de 1.5kg, posteriormente para evitar errores se aplica una carga de 20kg y se aplica RESET desde el controlador para poder iniciar el contador de medición de la elongación que se produce por la aplicación de carga, con el fin de evitar errores que produce el acomodo de las mordazas, posteriormente se fueron tomando datos correspondientes a cada variación de carga y de elongación de la pieza.⁵⁰

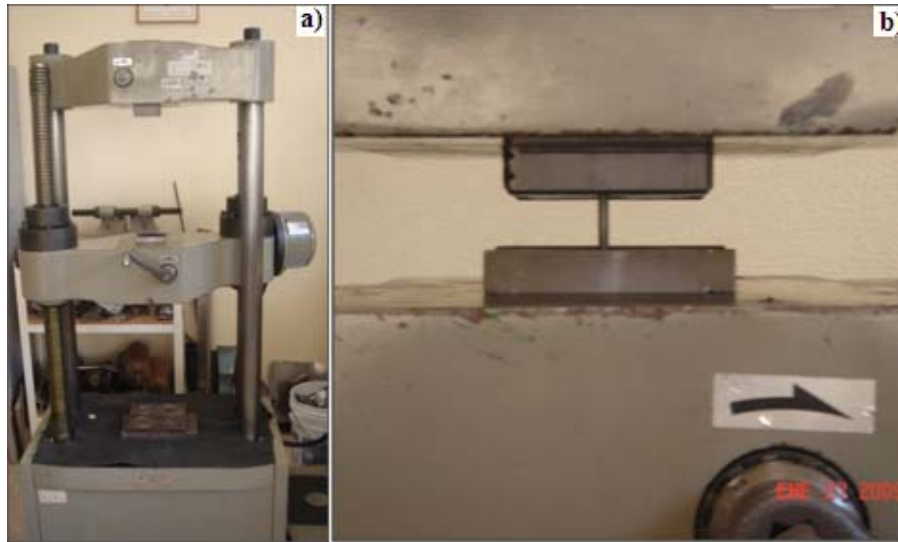


Figura 4.10a) Máquina de tensión, b) Mordazas de la máquina de tensión.

b) Dureza Brinell

La dureza Brinell es utilizada en los hierros, para determinar los valores de la dureza, se seccionaron los discos de manera transversal y longitudinal, para obtener los especímenes de cada uno de los discos. La metodología empleada para efectuar los ensayos de dureza fue en base a la norma ASTM E10. El equipo utilizado fue un durómetro BRINELL.⁵¹

En la fig. 4.11 se muestra de que sección del disco fue obtenida la probeta para la prueba de dureza.



Figura 4.11 Extracción de la probeta para Ensayo de Dureza Brinell



Figura 4.12 Durometro Brinell



Figura 4.13 Indentaciones en la probeta del ensaye de dureza Brinell.

La fig. 4.12 muestra el equipo utilizado para medir la dureza y en la fig. 4.13 se muestra una probeta ensayada

4.3.4. Líquidos penetrantes

El ensayo por líquidos penetrantes es un ensayo no destructivo que se emplea para detectar e indicar discontinuidades abiertas a la superficie en materiales sólidos no porosos. El principio en el cual se basa esta técnica no destructiva es la capacidad de que un líquido pueda penetrar por capilaridad y ser retenido en las discontinuidades abiertas a la superficie como pueden ser fisuras y poros.

La inspección de líquidos penetrantes se llevo a cabo en los frenos de rotor hecho de la aleación actual. Esta evaluación no destructiva fue usada para determinar si se desarrollo alguna grieta o micro grieta en la superficie del rotor después de simular un episodio de frenado.

La inspección de líquidos penetrantes revelo la cantidad, tamaño y distribución de las diferentes grietas formadas sobre las muestras.

Por otra parte, se muestra que las grietas se desarrollan dentro del rotor de freno hacia el interior del componente alcanzando hasta 2.5 cm de profundidad (ver Fig. 4.14). Tal tamaño de la fisura es perjudicial para la integridad de este tipo de componentes críticos, más aún, estos defectos pueden inducir una falla catastrófica en cualquier momento dado.

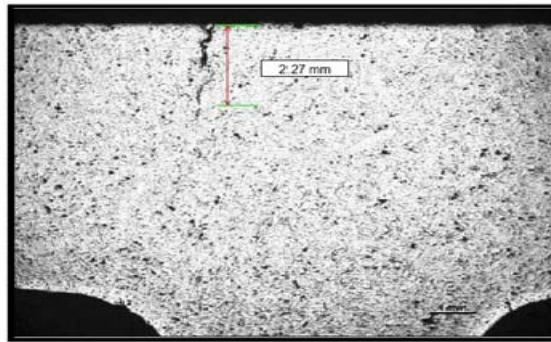


Figura 4.14 Corte transversal de un freno de rotor.

La figura 4.14 es un corte transversal de un freno de rotor que muestra la penetración de la fisura desarrollada dentro de la superficie del rotor.

Estas fisuras son el resultado de la interacción termo-mecánica entre el rotor y la balata. Se espera que por la fricción entre estos componentes se desarrollen algunos esfuerzos localizados a lo largo de la superficie de contacto. Además de la interacción mecánica, la fricción entre la balata y el rotor también genera calor. El calentamiento del rotor es más evidente en el caso de un frenado de emergencia.

Las siguientes figuras muestran al disco de freno bajo estudio, evaluado por medio de líquidos penetrantes, estedisco fue sometido a uso rutinario.



Figura 4.15 Aplicación de líquidos penetrantes a pista exterior del disco



Figura 4.16 Aplicación de líquidos penetrantes a pista interior del disco

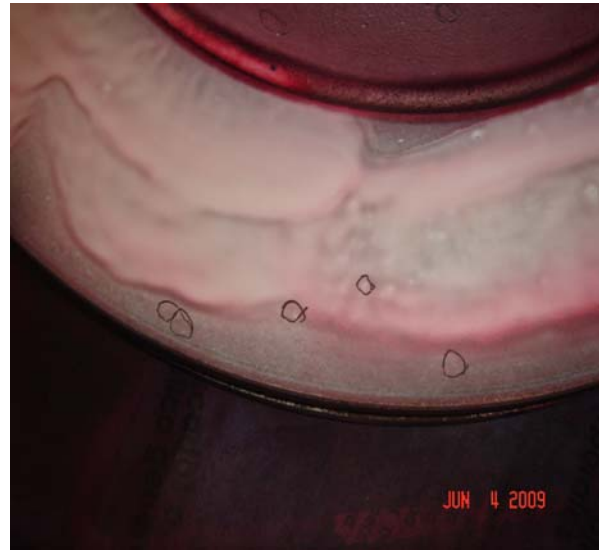


Figura 4.17 Grieta vista a través de microscopio

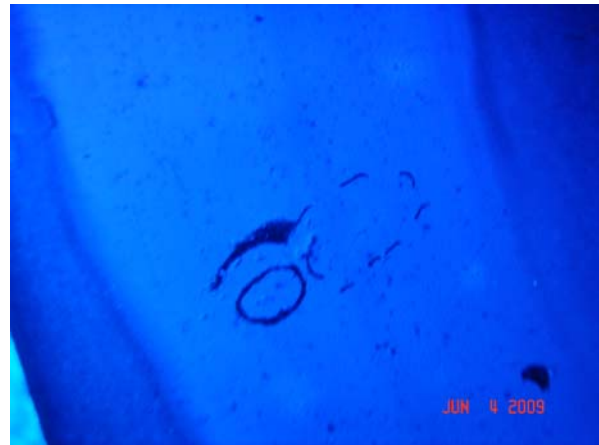


Figura 4.18 Grieta vista a través de luz UV

Las siguientes figuras muestran al disco de freno con la aleación diseñada, evaluado por medio de líquidos penetrantes, este disco fue sometido a uso rutinario.



Figura 4.19 Aplicación de líquidos penetrantes a disco diseñado



Figura 4.20 Revelación de grietas en pista exterior

4.3.5. Pruebas de desgaste

Estas pruebas fueron efectuadas con la finalidad de determinar los parámetros y/o variables de cada uno de los diseños de discos, relacionadas a las propiedades físicas, químicas, mecánicas y térmicas que van aunadas a los mecanismos de desgaste y que desempeñan un papel importante en el frenado y sobre los costos de mantenimiento (tasa de desgaste y la pérdida de material, coeficientes de fricción, etc.).⁵²

Estas pruebas se desempeñaron en una máquina tribológica de abrasión seca, según la norma ASTM la cual trabaja mediante un contrapeso el cual como fuerza normal para realizar el contacto entre la probeta a ensayar y un disco de acero con caucho vulcanizado girando a 200 RPM y un flujo de arena sílica que cae por medio de una torreta entre el disco y la probeta a un flujo controlado de 400 g/min bajo la norma ASTM G 65, este ensaye se realiza en 6 lapsos con una duración de 3 minutos y 27 segundos tiempo en el cual recorre 500 m, en cada uno de los lapsos se pesa la probeta para obtener el peso y llegar a una distancia de 3000 m, los pesos son dados con un alcance de hasta 0.0001 g.

Para representar los resultados bajo norma se debe de obtener el volumen perdido esto se obtiene mediante la siguiente relación (4.1).

$$\text{Volumen perdido (mm}^3\text{)} = \frac{\text{masa perdida (g)}}{\text{Densidad (g/cm}^3\text{)}} \times 1000 \quad (4.1)$$

La anterior formula arroja 2 variables, el volumen perdido y la densidad la cual podemos determinar con la siguiente formula (4.2) para así obtener el volumen perdido.

$$\text{Densidad (g/cm}^3\text{)} = 8.11 - (0.223 \times \%C) - (0.097 \times \%Si) - (0.071 \times \%P)$$



Figura 4.21 Maquina tribologica de abrasión seca

4.3.6. Conductividad térmica

Los cilindros metálicos fabricados de la aleación desarrollada se colocaron concéntricamente en un cilindro hueco de acero al bajo carbono fig. 4.20. El espacio entre la aleación y el cilindro se llenó con yeso, el cual es un cerámico de fraguado rápido y cuya función es servir de aislante térmico.

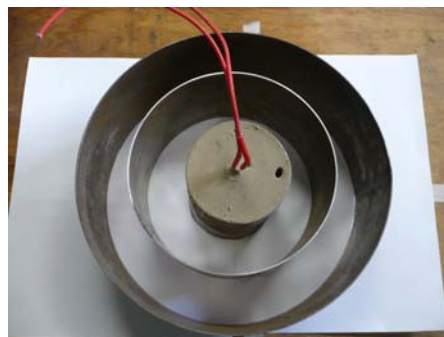


Figura 4.22 Cilindros fabricados para el experimento de medición.

Cabe mencionar que los extremos de cada muestra quedaron expuestos, y solo el cuerpo de las muestras quedó embebido en el cerámico. También debe citarse que las muestras montadas fueron rectificadas, para asegurar superficies perfectamente planas fig. 4.23.



Figura 4.23 Probetas de aleaciones.

De manera análoga, se montó en el cerámico la resistencia utilizada como fuente de calor. Como con las aleaciones a evaluar, se dejó expuesta a la intemperie el extremo de la resistencia, mientras que por el otro extremo del montaje, por medio de 2 cables se conecta la resistencia a la red eléctrica fig. 4.22.



Figura 4.24 Resistencia eléctrica utilizada para el experimento.

El propósito de dejar el extremo de la resistencia expuesto es el de poder colocar sobre ella la probeta de la aleación a ensayar, tal como se ilustra en la Figura 4.25 a continuación, donde q es el flujo de calor.

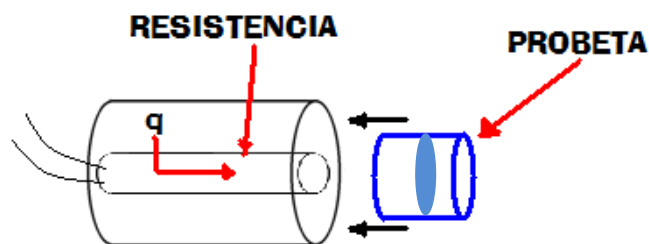


Figura 4.25 Concepto de la técnica experimental de medición.

A continuación se muestra como se calcularon los valores de la conductividad térmica del experimento realizado anteriormente

$$q'' = \frac{\dot{Q}}{A} = k \cdot \frac{T_1 - T}{l} \quad (4.2)$$

La ecuación (4.2) es conocida como la Ley de Fourier de conducción de calor. Donde q es el flujo de calor o la cantidad de energía transferida por unidad de área (W/m^2), T_1 y T_2 son los valores de temperatura ($^{\circ}C$), l representa el espesor de la placa (m) y k es la conductividad térmica del medio de transferencia ($W/m/^{\circ}C$).

Es posible determinar la cantidad de calor que se suministró a cada probeta, ya que la energía suministrada a las muestras es igual a la potencia, la cual se define mediante la siguiente relación:

$$q = P = V \cdot i \quad (4.3)$$

Donde q es la energía suministrada (W), P es la potencia (W), V es el voltaje aplicado a la fuente de calor (V) e i es la corriente que pasa a través de la fuente de calor (A).

Con esta información y conociendo el área de transferencia (definida por el diámetro de la muestra), se determina el heat flux impuesto al sistema. Con esto y con la diferencia de temperaturas entre los extremos de cada muestra, fue como se determinó el valor de la conductividad térmica.

En la Figura 5.11 se presenta el gráfico de conductividad contra temperatura, para cada una de las muestras analizadas.

Estas graficas se obtuvieron al despejar la conductividad térmica de la ley de Fourier (Ecuación 4.4)

$$q'' = \frac{\dot{Q}}{A} = K \cdot \frac{T_1 - T_2}{l} \quad (4.4)$$

De esta ecuación, se conocen los siguientes datos.

T_1 (Temperatura de la resistencia, l (Largo de la probeta), A (Área transversal de la probeta), T_2 (Temperatura de la probeta). Así mismo, se conoce la cantidad de calor (energía) suministrada a la probeta, ya que se midió y registro de manera continua el voltaje y la corriente aplicada a la muestra.

Cabe señalar que el producto voltaje por corriente da como resultado la potencia o en otros términos la energía suministrada al sistema por unidad de tiempo.

Con esta información, se puede anticipar que la conductividad térmica se puede estimar de acuerdo a la siguiente relación (4.5).

$$K = \frac{q'' \cdot l}{\Delta T} \quad (4.5)$$

4.3.6.1. Descripción del experimento.

Se realizó con la finalidad de obtenerla temperatura en el extremo expuesto de la resistencia (fuente de energía). Conforme se aplicó el voltaje y consecuentemente la corriente, se midió la temperatura en el extremo expuesto de la resistencia con un termopar (tipo K).

Estas mediciones se realizaron de manera constante hasta que la temperatura de la resistencia se mantuvo constante. Una vez alcanzada esta condición; se siguió registrando la temperatura del extremo de la resistencia por 2 horas, esto para confirmar que se alcanzó el estado estable.

Cada una de las muestras se colocaron en frente de la resistencia una vez que esta alcanzó el estado estable y a partir de su colocación (de las muestras), se comenzó el registro de datos (voltaje, corriente y temperaturas).

Con la información generada, se construyeron gráficos de conductividad térmica contra temperatura, mismos que se analizaran y discutirán en las secciones posteriores de este texto.

El equipo utilizado en el desarrollo de esta investigación consta de lo siguiente:

- Sistema de adquisición de datos HydraFluke™
- Termómetro infrarrojo Rayltek
- Variac de 127 VAC a 250 VAC y 6 A
- Una resistencia de valor fijo a 50Ω
- Multímetro Fluke™
- 2 termopares tipo K
- 1 terminal para conexiones eléctricas
- 1 computadora personal

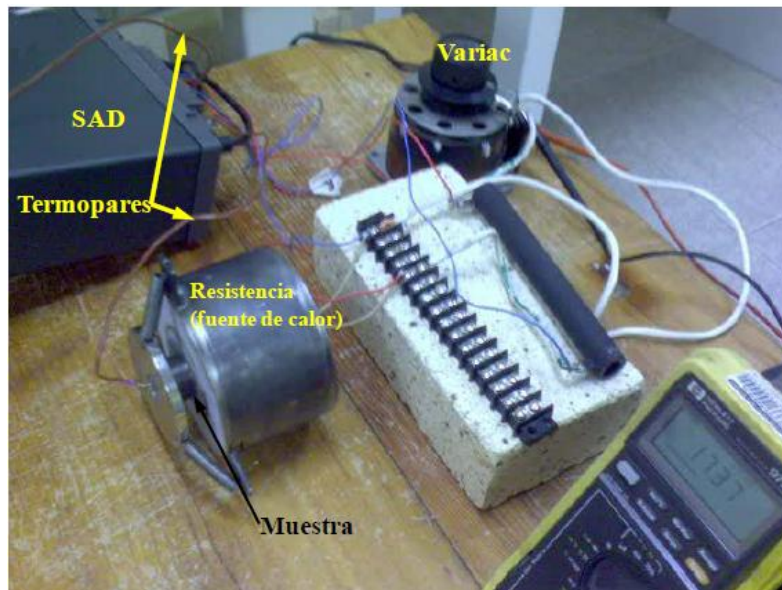


Figura 4.26 Equipo utilizado en experimento de conductividad térmica.

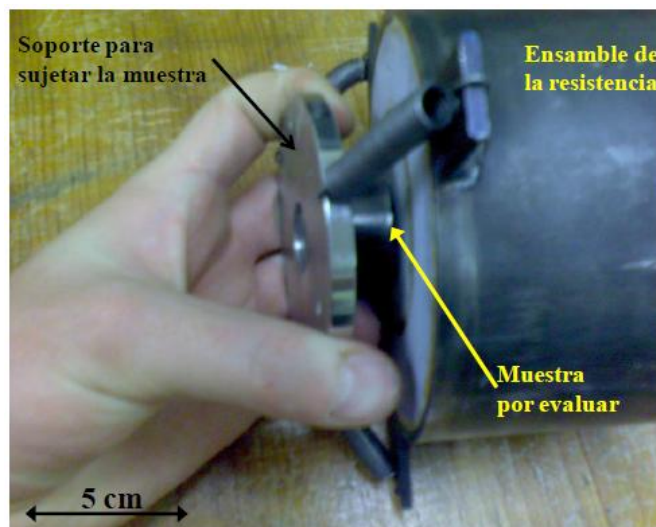


Figura 4.27 Montaje de las probetas y la resistencia utilizada en la medición de k .

4.3.7. Validación del diseño

Se realizó por medio de una máquina de prueba o banco dinamométrico con el fin de medir la capacidad de disipación de calor del disco de freno a diferentes condiciones de frenado, utilizando una cámara térmica para medir la temperatura en el disco de freno.⁵³

El disco de freno fue ensamblado en una prueba (dinamómetro) de tal manera que el rotor y la balata estén completamente expuestos a una cámara infrarroja. Al disco se le permitió rotar a 2000 RPM y de manera súbita un episodio de frenado fue impuesto. Imágenes del calentamiento de la superficie del disco se tomaron continuamente en intervalos de 0.2 s.

Las imágenes digitales obtenidas con la cámara nos permiten analizar la distribución de temperaturas superficiales en el disco y estimar el conjunto de flujos de calor que participan durante el frenado, tanto espacial como temporalmente.

Fueron impuestos episodios de frenado súbitos. Se muestra en la gráfica la temperatura media en la superficie en función del tiempo de una sucesión de episodios de frenado (ver Fig. 4.28).

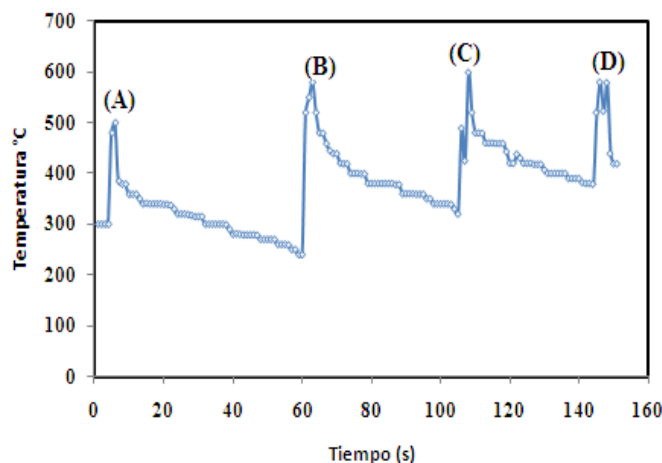


Figura 4.28 Evolución de las temperaturas promedio.

Se muestran cuatro instantáneas de las temperaturas máximas (ver Fig. 4.29) indicadas en la gráfica de la Figura 4.28. Observe que el episodio (D) su termografía muestra un calentamiento muy uniforme. Las termografías infrarrojas fueron obtenidas con una cámara digital de infrarrojos modelo FLIR-T710 que detecta diferencias de temperatura de hasta 0.08 °C. Imágenes infrarrojas representativas del calentamiento del rotor durante el frenado se muestran en la Fig. 4.30. Estas imágenes corresponden al episodio denominado (A) en la Fig. 4.29. En este caso, las fotos instantáneas fueron tomadas cada 1/15 s. En la Fig. 4.31 tres etapas importantes de temperaturas son mostradas: (a) antes, (b) durante y (c) después del frenado súbito.

Las imágenes también tienen una alta resolución. Este detalle nos permite obtener información precisa de la distribución de temperatura en la superficie del rotor y de estimar,

mediante el empleo de análisis de imágenes digitales, los fenómenos importantes que ocurren durante el frenado: por ejemplo, en la Fig. 4.30(b) se observa que durante el frenado, en el instante de la temperatura máxima, hay tres anillos que indican un contacto friccional no uniforme y, por consiguiente, una disminución de la superficie de contacto efectivo de la balata con el rotor.

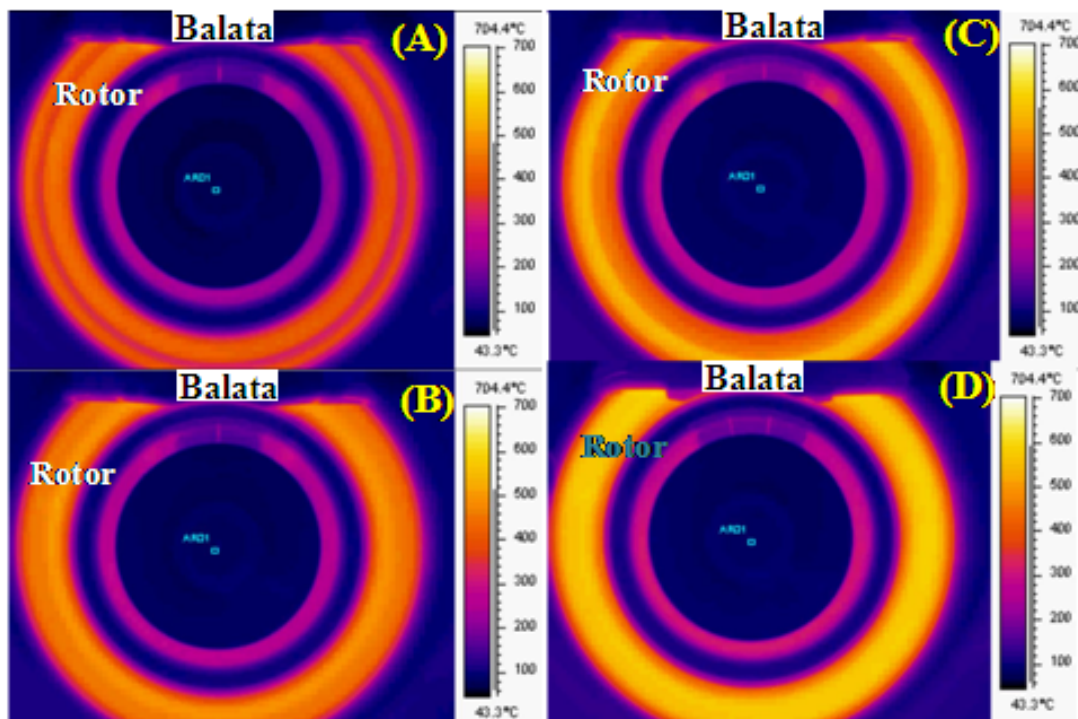


Figura 4.29 Termografías infrarrojas de la distribución de temperaturas máximas durante el frenado.

La figura 4.29 muestra a los puntos (A)-(D) en la gráfica de la figura 4.28. Observe una distribución uniforme de la temperatura sobre la superficie de la pista de frenado, esta se alcanza en el último episodio de frenado (D).

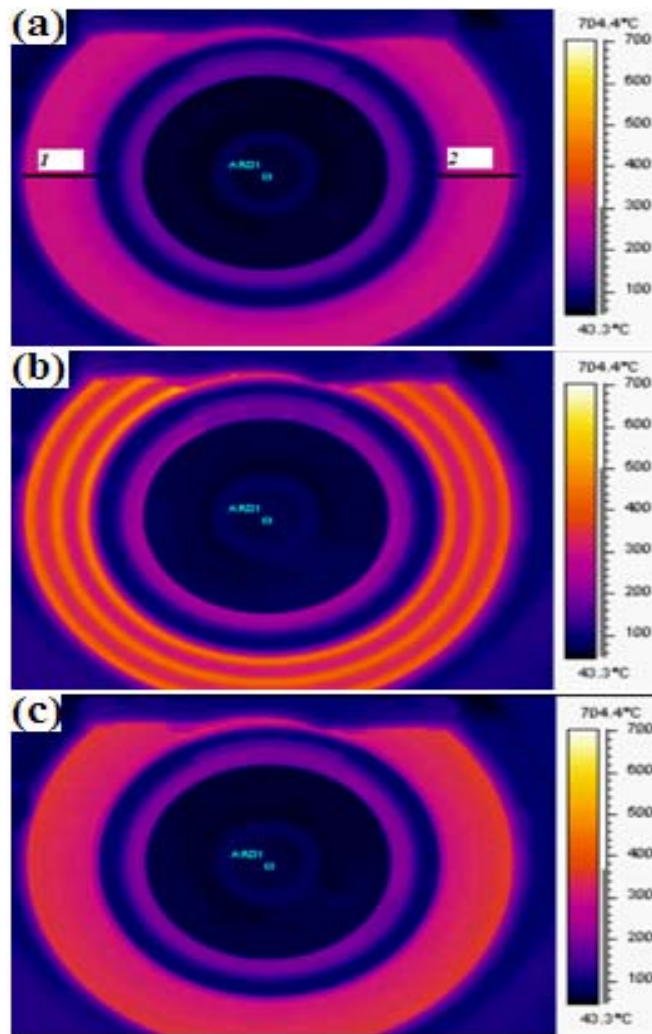


Figura 4.30 Instantáneas térmicas del frenado

Figura 4.30 muestra (a) Termografía previa al frenado, (b) Termografía que pone en evidencia tres puntos de calentamiento radial (c) distribución de temperaturas uniforme cuando el rotor gira a una constante velocidad angular.

Una estimación cuantitativa de los valores de temperatura en esos anillos se muestra en la Figura 4.31 donde el tamaño de los anillos puede estimarse en 10 mm cada uno. Las dimensiones del tamaño de estas estructuras pueden ser útiles para estimar de manera real el radio del área real y el área de contacto aparente, $R = A_r/A_a$ [2]. En este caso se ha estimado que $R = 0.50$.

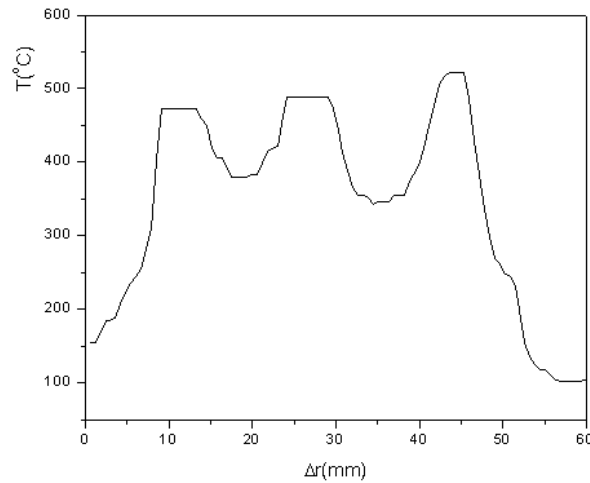


Figura 4.31 El perfil de temperatura

La figura 4.31 muestra el perfil de temperatura a lo largo de la línea 1 indicada en la (Fig. 4.30(a)) en el instante de la temperatura superficial máxima en el rotor de freno (Fig. 4.30(b)). Observe el fuerte aumento de la temperatura respecto a la temperatura entre los anillos.

En la fig. 4.31, se muestra el perfil de temperatura sobre la superficie de la pista de frenado del disco, mostrado en la fig. 4.30 (b).

Según recientes estudios teóricos, es posible establecer que, en este episodio, el valor de R da la máxima temperatura T_{max} , porque se produce un aumento de temperatura con una disminución a la relación del área de contacto. Este resultado podría ser útil para mejorar el diseño de la composición y el funcionamiento del rotor y la balata.

Por otra parte, cuando la temperatura del sólido es uniforme en el espacio es posible estimar el almacenamiento de energía (perdida) en el rotor durante cada episodio de frenado, es dado como (4.6):

$$\dot{E} = mc \frac{dT}{dt}, (4.6)$$

donde, m es la masa del rotor y c es el calor específico del material. La derivada de la Temperatura T respecto al tiempo t es proporcional a tal energía. Se muestra el perfil de temperatura superficial máxima durante el episodio de frenado y su grafica de dT/dt como una función del tiempo se da en la Fig. 4.32 (b). De la grafica (ver Fig. 4.32 (b)) es evidente que durante el frenado el rotor tenga ganancias de energía (valores positivos dT/dt) de un modo suave debido al rozamiento pero la perdida de energía térmica en forma discontinua, principalmente a través de la conducción y el mecanismos de radiación y después a través de la convección porque a altas velocidades este es el principal mecanismo de pérdida de calor.

También, la termografía infrarroja revela correctamente que a altas velocidades (antes y después del episodio de frenado) la temperatura es ligeramente superior en el lado derecho respecto al izquierdo (Ver Fig. 4.33). Esto significa que en la mitad de una revolución el rotor pierde calor, por el mecanismo de convección, esto es alrededor de 10 °C. Se puede concluir que en este último caso, las aletas ayudan a enfriar eficientemente al rotor.

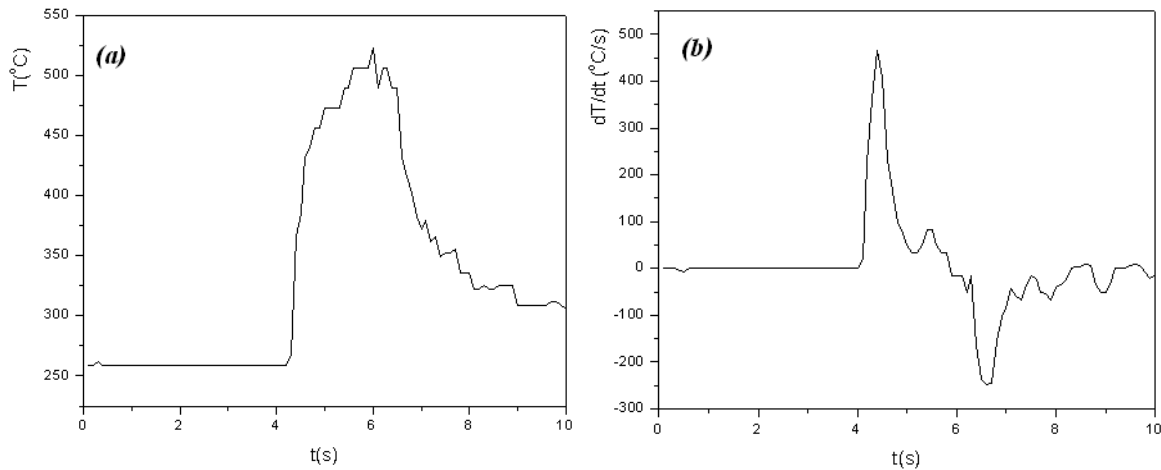


Figura 4.32 El cambio puntal de la temperatura máxima en función del tiempo

La figura 4.32 muestra (a) el cambio puntal de la temperatura máxima en función del tiempo durante el episodio de frenado. (b) derivada dT/dt para el perfil dado en (a). Esta cantidad es proporcional a la energía.

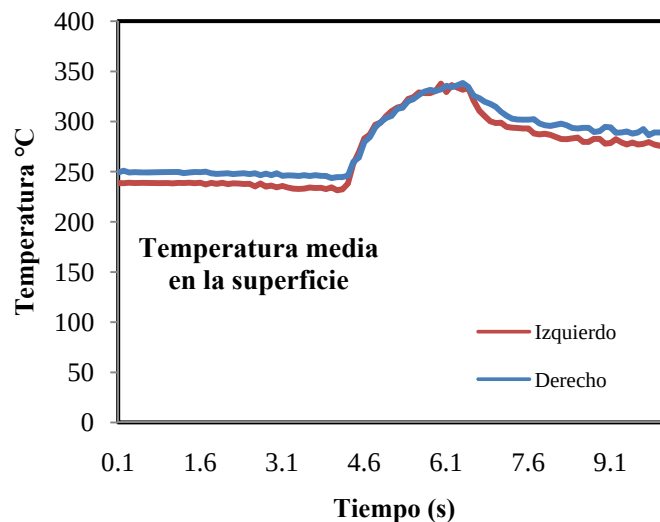


Figura 4.33 Temperatura superficial promedio lado izquierdo (rojo) y lado derecho (azul) del disco.

La fig. 4.33 muestra la temperatura promedio en la superficie del disco en el lado izquierdo y derecho.

CAPITULO 5. RESULTADOS OBTENIDOS, ANALISIS Y DISCUSION

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la metodología experimental descrita en el capítulo 4.

5.1. Análisis químico

Se realizó el análisis químico de los discos de frenos fabricados experimentalmente D1, D3, D4, D5, D6, D7. En la tabla No. 5.1 se muestra las composiciones químicas determinadas para las aleaciones de hierro gris hipereutéctico probadas en este trabajo.

Prueba	CE	C	S	Si	Mn	Cr	Mo	Cu	P	Sn
D1	4,312	3,716	0,064	1,752	0,742	0,119	0,09	0,238	0,035	0,056
D2	4,33	3,65	0,125	2,04	0,55	0,11	0	0,15	0	0
D3	4,354	3,795	0,054	1,632	0,738	0,125	0,108	0,246	0,045	0,054
D4	4,372	3,699	0,049	1,987	0,761	0,15	0,101	0,265	0,033	0,055
D5	4,426	3,735	0,072	2,036	0,745	0,138	0,087	0,245	0,036	0,049
D6	4,485	3,783	0,058	2,062	0,756	0,097	0,098	0,251	0,045	0,067
D7	4,508	3,815	0,052	2,047	0,716	0,109	0,094	0,235	0,033	0,048

Tabla 5.1 Composiciones químicas determinadas

5.2. Análisis micro estructural

La microestructura obtenida consistió de hojuelas de grafito tipo A en una matriz perlítica. Las probetas fueron tomadas de la pista de frenado del disco, éstas fueron pulidas para observar la morfología gráfica en un microscopio óptico a 100X. Para determinar la composición de fases, las probetas fueron atacadas con Nital al 2% y fueron observadas a 400X⁵³. Los resultados son reportados en la Tabla 5.2.

Prueba No	CE (%)	Microestructura			Morfología	gráfica
		Perlita	Ferrita	Carburos	Clase	Tamaño
D1	4,312	> 98 %	< 2%	< 1	A	3, 4, 5
D2	4,33	> 98 %	< 2%	< 1	A	3, 4, 5
D3	4,354	> 98 %	< 2%	< 1	A	3, 4, 5
D4	4,372	> 98 %	< 2%	< 1	A	3, 4, 5
D5	4,426	> 98 %	< 2%	< 1	A	3, 4, 5
D6	4,485	85/90%	10 / 15 %	< 1	50%A+50%C	1, 2, 3
D7	4,508	85/90%	10 / 15 %	< 1	50%A+50%C	1, 2, 3

Tabla 5.2 Microestructuras y morfología obtenida en los discos

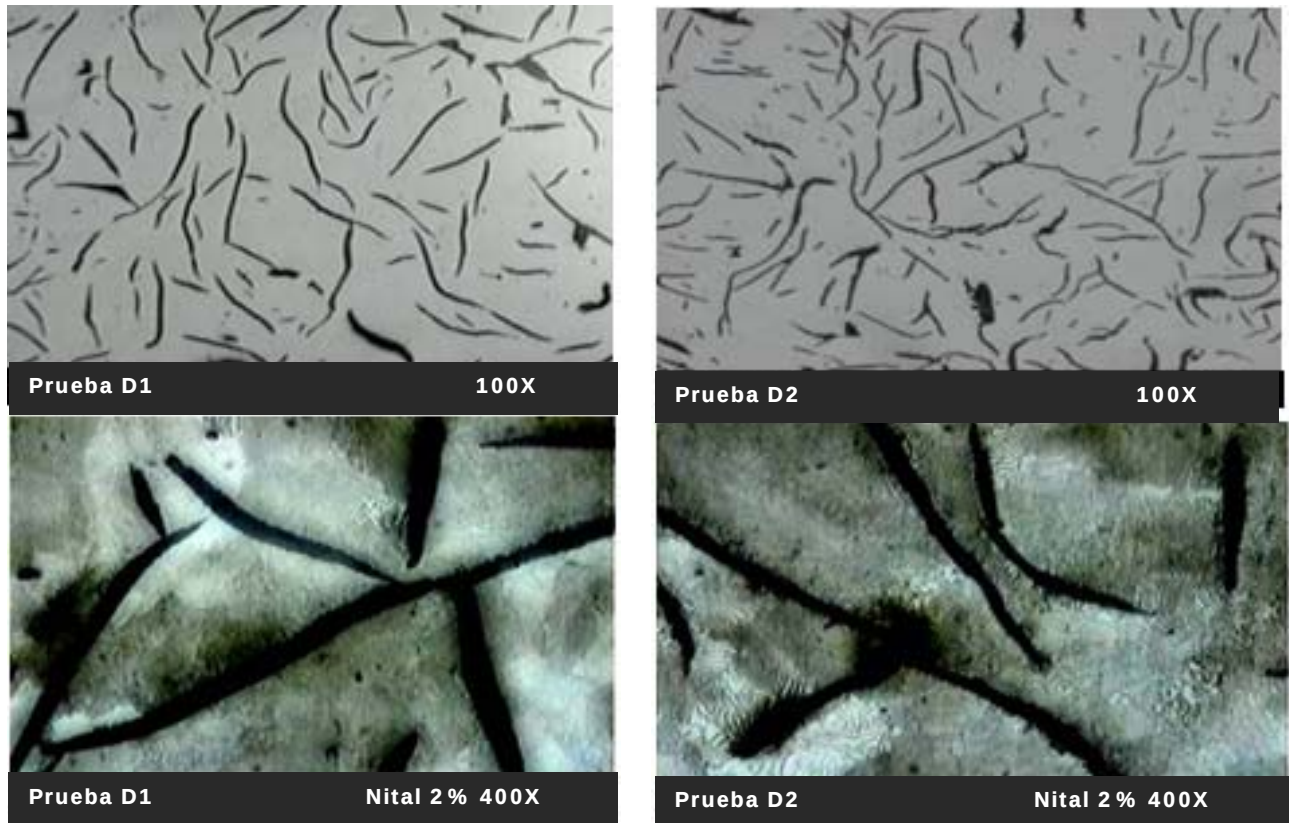


Figura 5.1 Micro estructuras de disco D1 fabricado experimentalmente y disco D2 que está en estudio en este trabajo.

En la figura 5.1 se muestran las microestructuras obtenidas en el disco D1 fabricado de manera experimental y del disco D2 (para el cual se está desarrollando este trabajo) ambos cuentan con hojuelas de grafitos tipo A en hierros grises con $CE=4.312(D1)$, $CE=4.354(D2)$ en una matriz con 98% de perlita y 2% de ferrita.

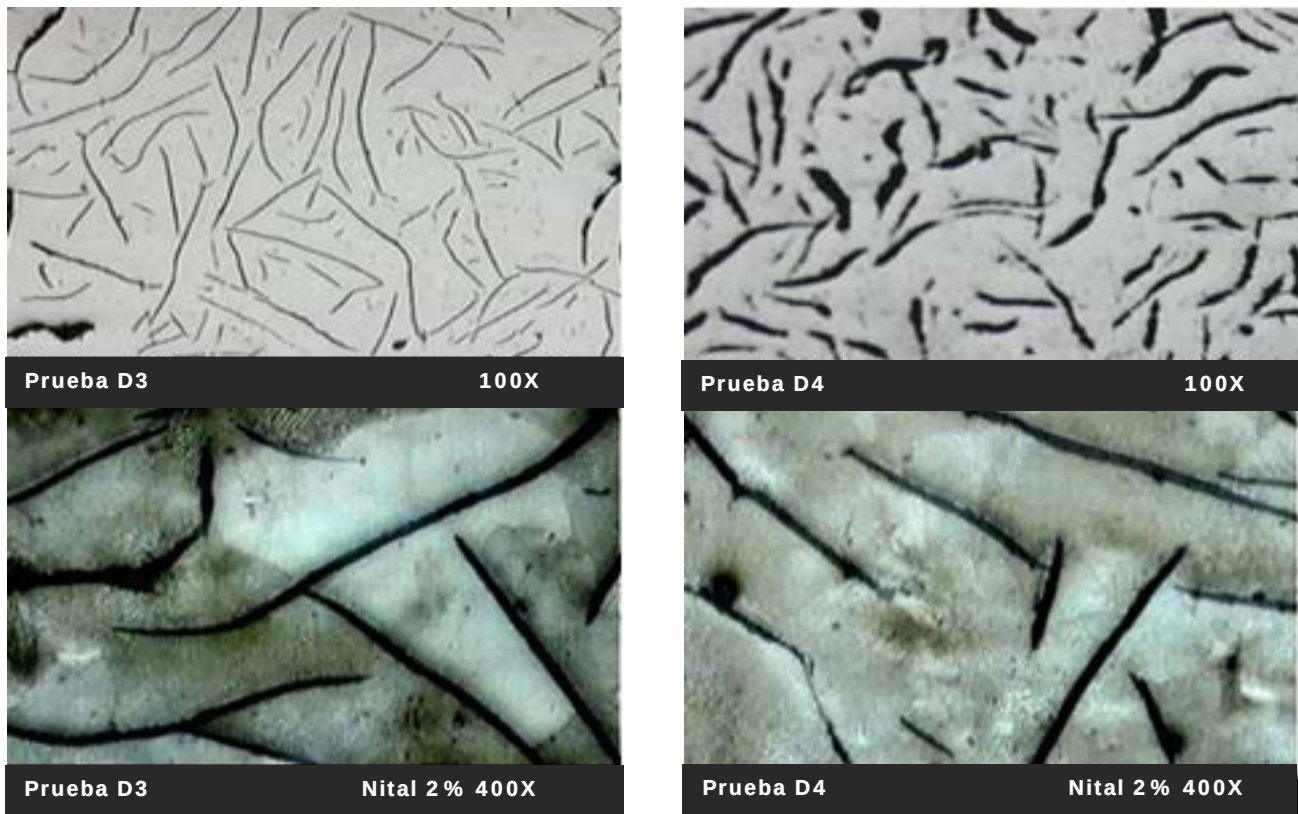


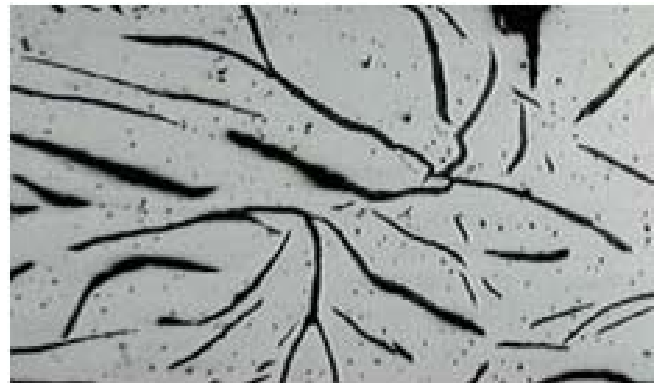
Figura 5.2 Micro estructuras de discos D3 y D4 fabricados experimentalmente.

En la figura 5.2 se muestran las microestructuras obtenidas de los discos D3 y D4 fabricados de manera experimental cuentan con hojuelas de grafitos tipo A en hierros grises con $CE=4.372$ (D3) y $CE=4.426$ (D4), en una matriz con 98% de perlita y 2% de ferrita máximo.



Prueba D5

100X



Prueba D6

100X



Prueba D5

Nital 2 % 400X



Prueba D6

Nital 2 % 400X

Figura 5.3 Micro estructuras de discos D5 y D6 fabricados experimentalmente

En la figura 5.3 se muestran las microestructuras obtenidas de los discos D5 y D6 fabricados de manera experimental cuentan con hojuelas de grafitos tipo C en hierros grises con $CE=4.485$ (D5) y $CE=4.508$ (D6) en una matriz con 85/90% de perlita y 10/15% de ferrita.

5.3. Pruebas mecánicas

La siguiente tabla muestra los resultados de las pruebas mecánicas realizadas a los discos fabricados experimentalmente donde se muestra su Dureza (HB), Resistencia a la tensión (Rt), Resistencia a la compresión (Rc) y Modulo de elasticidad⁵⁴.

Prueba No	CE (%)	Dureza HB	Rt(Mpa)	Rc (0.2) (Mpa)
D1	4,312	198,6	306,33	233,4
D2	4,33	152	149,48	-
D3	4,354	213,3	261,71	219,83
D4	4,372	185,6	216,76	188,75
D5	4,426	186,4	201,4	190,98
D6	4,485	162,4	176,82	-
D7	4,508	179,3	184,7	-

Tabla 5.3 Resultados de pruebas mecánicas a discos fabricados experimentalmente

Probeta	Modulo de elasticidad	MPa	GPa
D1	100	10000	10
D3	110	11000	11
D4	110,52	11052	11,052
D5	135	13500	13,5
D6	113,04	11304	11,304
D7	100	10000	10

Tabla 5.4 Modulo de elasticidad de discos fabricados experimentalmente

5.4. Influencia de los elementos grafitizantes sobre las propiedades mecánicas

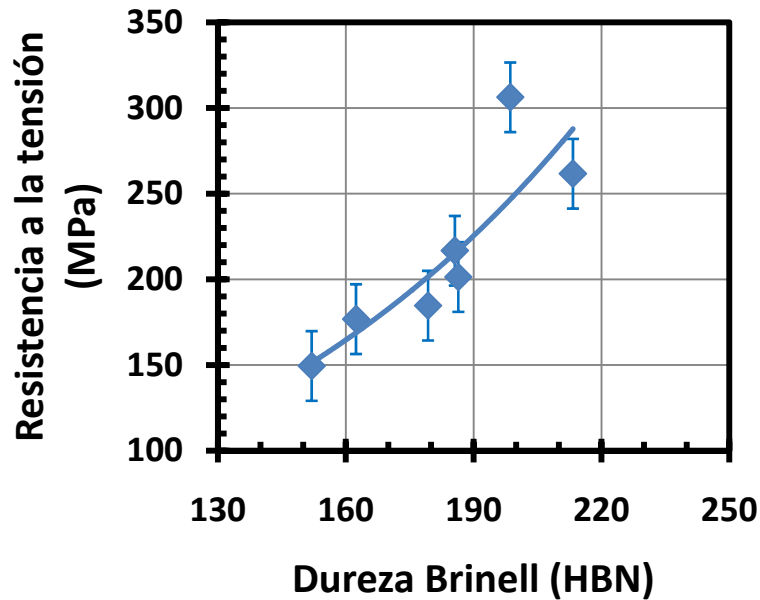


Figura 5.4 Influencia de los elementos grafitizantes en las propiedades mecánicas

En la figura No. 5.4 se puede observar la influencia que tienen los aleantes grafitizantes en la fundición de hierro gris al incrementan sus propiedades mecánicas⁵⁵.

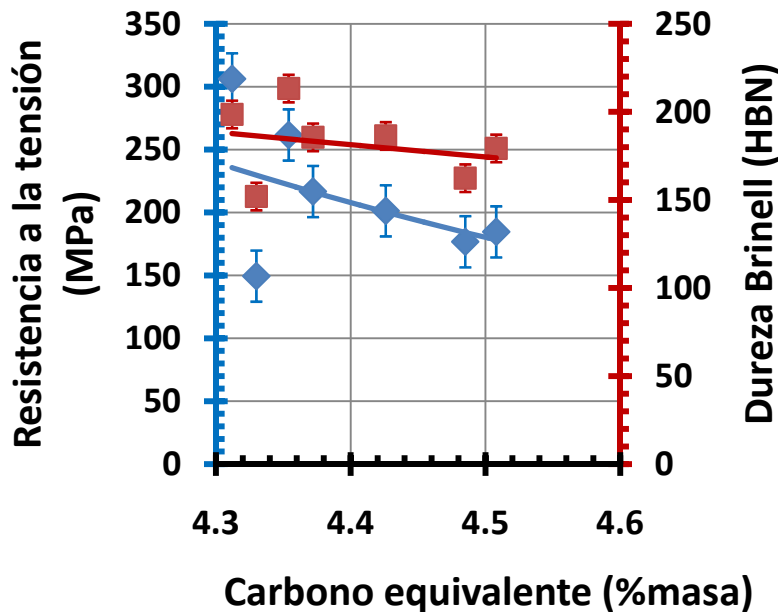
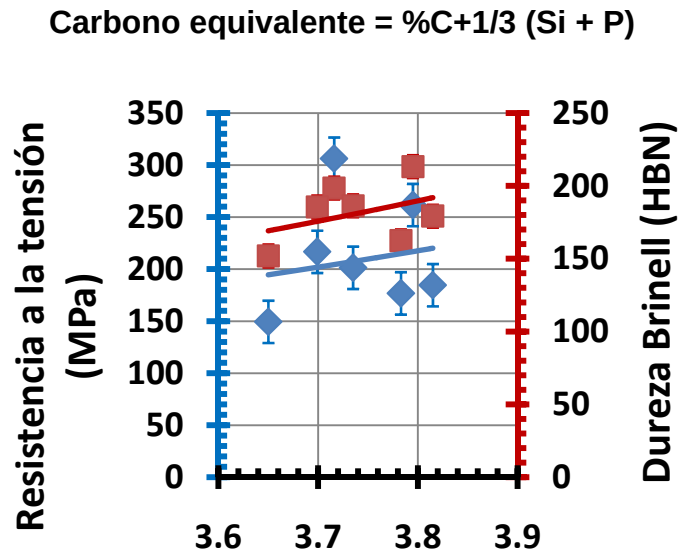


Figura 5.5 Influencia del carbono equivalente en las propiedades mecánicas

En la figura No. 5.5 cuando la concentración de carbono equivalente (%CE) es mayor, la dureza y resistencia a la tensión disminuyen, esto se debe a que al aumentar los contenidos de carbono y silicio favorecen a la nucleación de grafito y como consecuencia aumenta el número de granos eutécticos⁵⁶.



Contenido de carbono (%masa)

Figura5.6 Influencia del carbono en las propiedades mecánicas

En la figura No. 5.6 se muestra el efecto del carbono en las propiedades mecánicas, el cual debe ser controlado para obtener las propiedades deseadas.

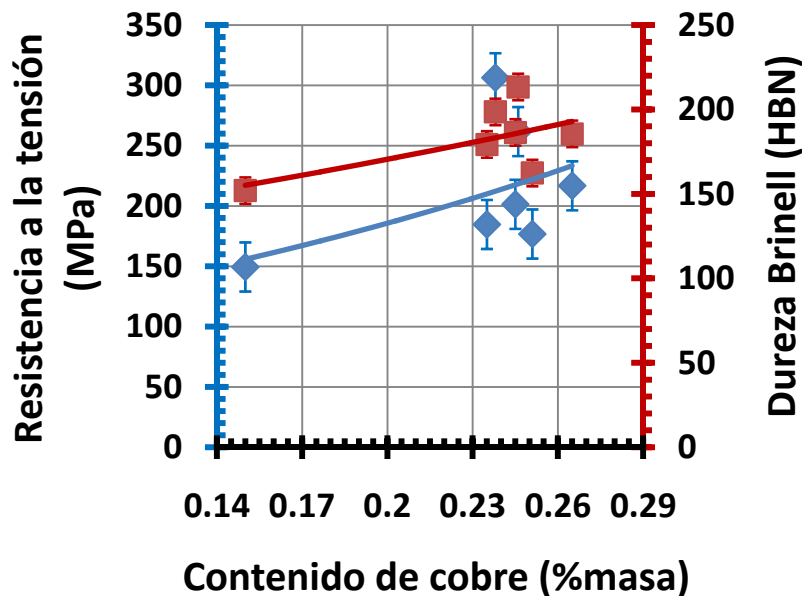


Figura 5.7 Influencia del cobre en las propiedades mecánicas

En la figura No. 5.7 se observa que al incrementar el contenido de cobre las propiedades mecánicas aumentan, el cobre tiene efecto grafitizador leve, disocia la cementita maciza haciendo menos frágil la matriz, pero sobre todo aumenta la resistencia a la corrosión y mejora la conductividad térmica.

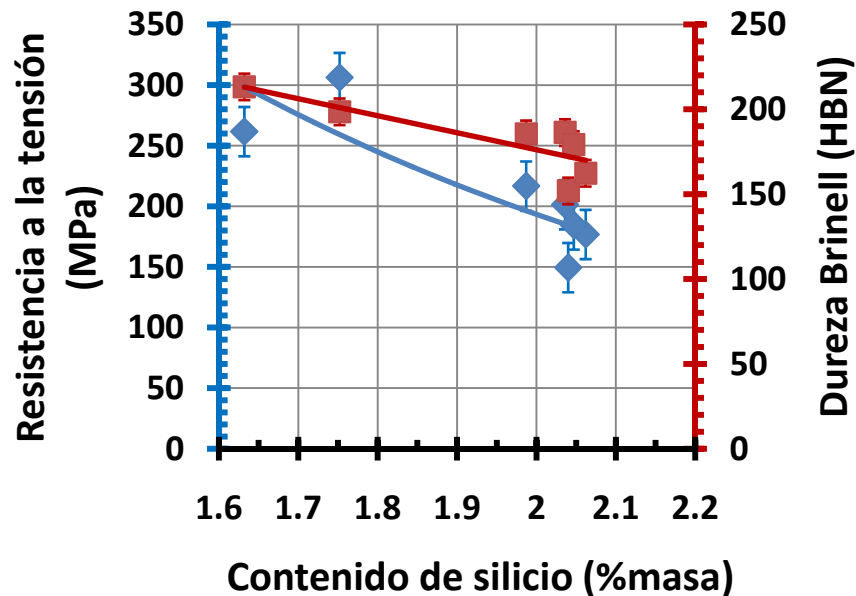


Figura 5.8 Influencia del silicio en las propiedades mecánicas

En la figura No. 5.8 al aumentar los contenidos de silicio la resistencia y la dureza en los discos de freno disminuye, esto es debido a que el silicio es un potente grafitizante el cual aumenta la fracción de grafito, su longitud y la fracción de ferrita⁵⁷.

5.5. Influencia de los elementos grafitizantes sobre las propiedades térmicas

En esta sección se analizarán la influencia de los elementos grafitizantes sobre las propiedades térmicas de los hierros hipoeutécticos e hipereutécticos. Además se revisarán los resultados obtenidos del experimento para medir la conductividad térmica de las probetas.

A continuación en la figura 5.9 se muestran los valores teóricos de la conductividad en los hierros hipoeutécticos e hipereutécticos

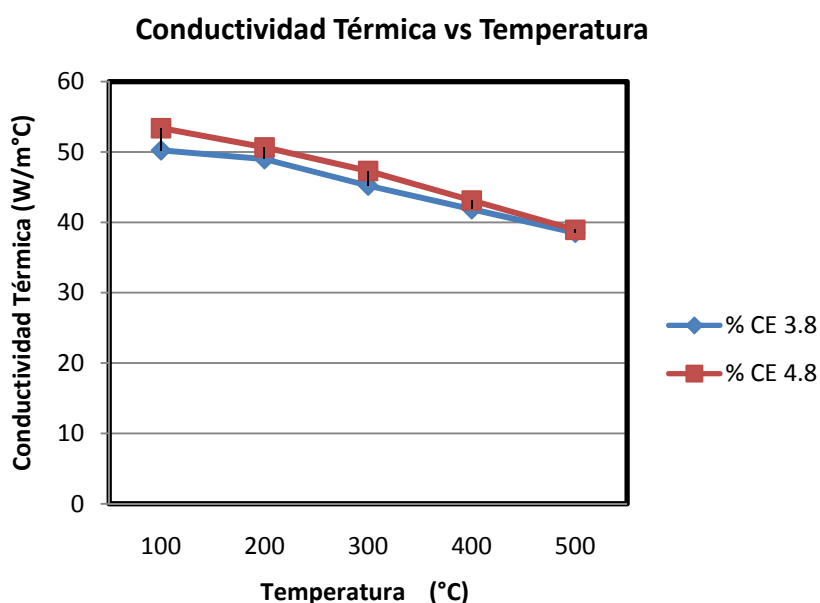


Figura 5.9 Conductividad térmica de hierros hipoeutécticos vs hierros hipereutécticos

% CE	100	200	300	400	500
Hipoeutécticos 3,8	50,24	48,99	45,22	41,87	38,52
Hipereutécticos 4,8	53,39	50,66	47,31	43,12	38,94

Tabla 5.5 Valores de conductividad térmica de hierros hipoeutécticos vs hierros hipereutécticos

De acuerdo a los valores de la tabla 5.5 los hierros hipereutécticos muestran una mejor conductividad térmica lo que significa una mejor disipación del calor.

La conductividad térmica en los hierros grises en general es dependiente de su estructura. Por ejemplo la estructura perlítica muestra una marcada reducción en cerca de $0.01 \text{ cal/cm/cm}^2/\text{s/}^\circ\text{C}$ ($4 \text{ W/m/}^\circ\text{C}$)⁵⁸.

Algunos estudios como los publicados por Donaldson and Söhnchen muestran claramente que los elementos aleantes en la matriz sílica son los más significativos.

Carbono

El incremento del contenido del Carbono reduce la conductividad térmica debido al consecuente incremento en las cantidades de los micro-constituyentes como perlita y cementita.

Silicio

El efecto grafitizador del silicio favorece la formación del grafito que posee una alta conductividad térmica y resistencia al choque térmico, pero se debe cuidar el contenido de silicio ya que puede debilitar la matriz afectando a la resistencia.

Manganeso

Un incremento del Mn en 1.5% reduce la conductividad térmica en 3.3%.

Fósforo

Este elemento proporciona una reducción en la conductividad térmica equivalente a un 6% por cada 1% de adición de Fósforo.

Aluminio

En general, el aluminio tiene una importante influencia en la reducción de la conductividad térmica en las fundiciones.

Cromo

Aquí tenemos una situación contradictoria, por un lado Donaldson⁵⁹ afirma que el aumento en 0.5 en Cr representa un aumento del 7% en la conductividad; pero por otro lado Söhnchen⁶⁰ revela que ocurre un decremento importante del 15% en la conductividad por cada 0.5% de aumento del Cr.

Cobre

Este elemento también reduce la conductividad térmica de una manera importante durante el rango 0-2% de aumento en Cu, pero a partir del 3% de aumento en el mismo, la reducción en la conductividad es prácticamente nula.

Níquel

Un aumento en 1% de Ni muestra una reducción del 5-6% en la conductividad, sin embargo, si el Si decrece simultáneamente con la adición del Ni, entonces la conductividad puede incrementarse.

Molibdeno

Tiende a incrementar en 7% la conductividad por cada 0.58% de Mo.

Tungsteno

Datos muy similares a los del Mo, incrementa la conductividad térmica en 7% por cada 0.5% de Tu.

Vanadio

No hay cambio en la conductividad por la adición o reducción en el porcentaje.

En la tabla 5.6 se muestra la composición química de 2 de las probetas utilizadas en el experimento para medir la conductividad térmica.

%	Probeta 1	Probeta 2
%C	3.65	3.55
%Si	2.04	1.9
%Ni	0.072	0.02
%Mn	0.55	0.82
%S	0.1246	0.064
%Cr	0.11	0.20
%Cu	0.15	0.10
%P	0.15	0.15

Tabla 5.6 Composiciones químicas de probetas para medir conductividad térmica

Con los datos obtenidos de la composición química se calcula el Carbono Equivalente de ambas muestras para su clasificación

$$\%CE = \%C_T + 1/3(Si+P)$$

$$\%CE_{\text{Probeta 1}} = 3.65 + 1/3(2.04+0.15) = 4.38 \text{ **Hipereutético**}$$

$$\%CE_{\text{Probeta 2}} = 3.55 + 1/3(1.9+0.15) = 4.23 \text{ **Hipoeutético**}$$

La probeta 1 es un hierro hipereutético mientras que la probeta 2 es un hierro hipoeutético en función de su contenido de carbono equivalente.

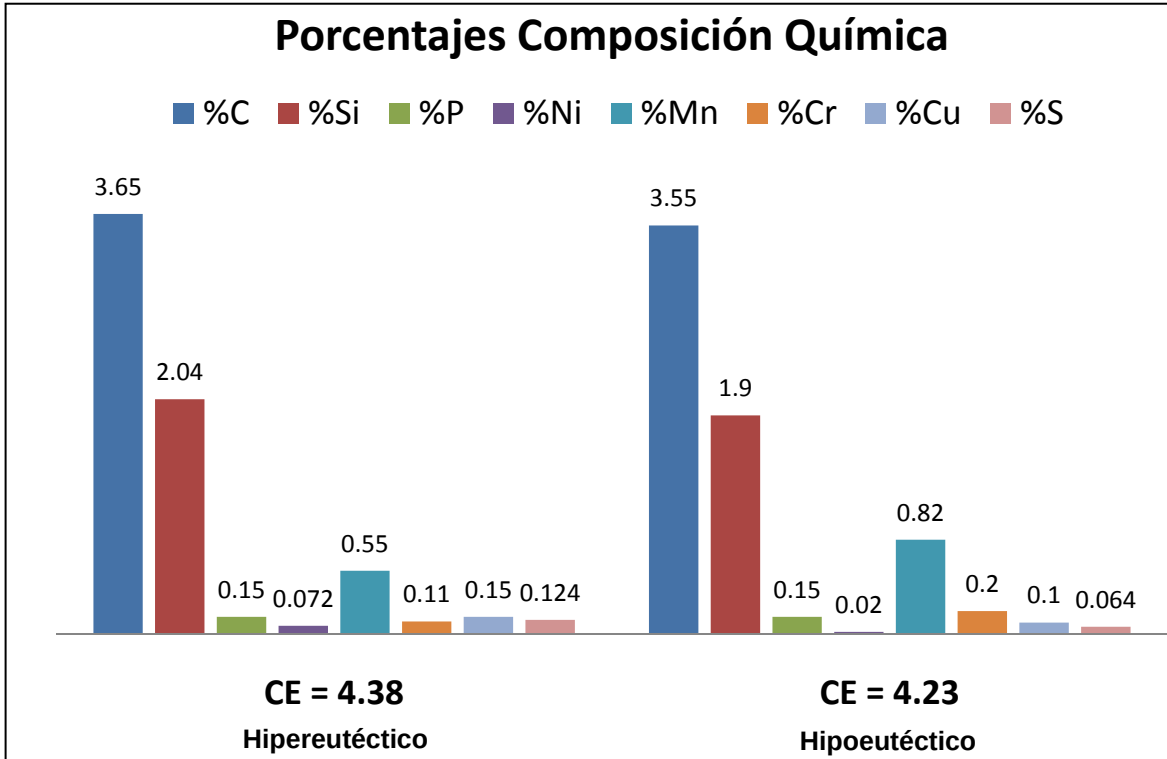


Figura 5.10 Porcentajes de composición química de probetas utilizadas para medir conductividad

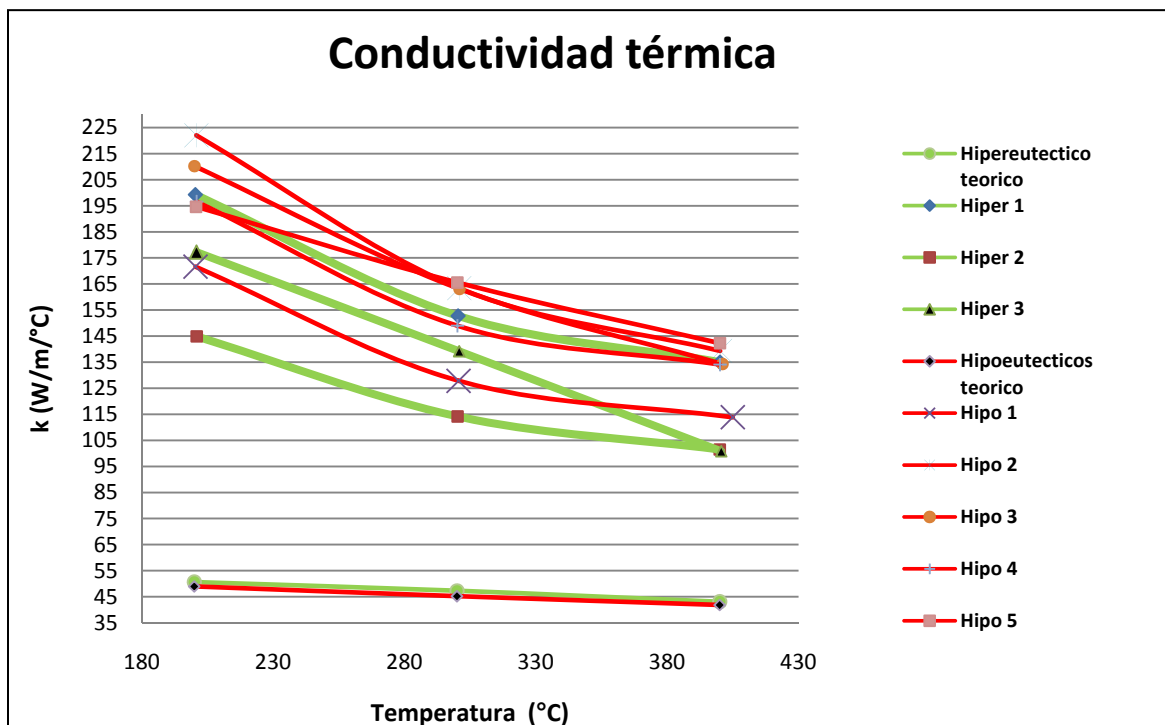


Figura 5.11 Conductividad térmica experimental de hierro hipereutético e hipoeutético

La figura 5.11 muestra las graficas de la conductividad térmica obtenidas por medio del experimento realizado. Las probetas en hierro hipoeutéctico se les asignaron los nombres de Hipo 1 a Hipo 5, las probetas en hierro hipereutéctico están identificadas como Hiper 1 a Hiper 3. Además se muestran las graficas los valores teóricos de la conductividad térmica para ambos tipos de hierro.

A continuación se muestran los valores de la conductividad obtenidos del experimento de las 8 probetas.

Hiper 1		Hiper 2		Hiper 3	
Temp°C	k	Temp°C	k	Temp°C	k
200.43	199.31	200.92	144.92	200.84	177.22
300.40	152.76	300.22	114.18	300.85	139.21
400.14	135.05	400.01	101.52	400.59	100.83

Tabla 5.7 Conductividad térmica experimental de probetas Hiper 1 a Hiper 3

Hipo 1		Hipo 2		Hipo 3		Hipo 4		Hipo 5	
Temp°C	k	Temp°C	k	Temp°C	k	Temp°C	k	Temp°C	k
200.50	171.63	200.84	222.01	200.07	210.23	200.93	196.56	200.66	194.62
300.59	127.86	300.85	163.41	300.95	163.08	300.18	149.01	300.13	165.56
404.99	113.89	400.18	139.36	401.08	134.33	400.11	134.13	400.10	142.30

Tabla 5.8 Conductividad térmica experimental de probetas Hipo 1 a Hipo 5

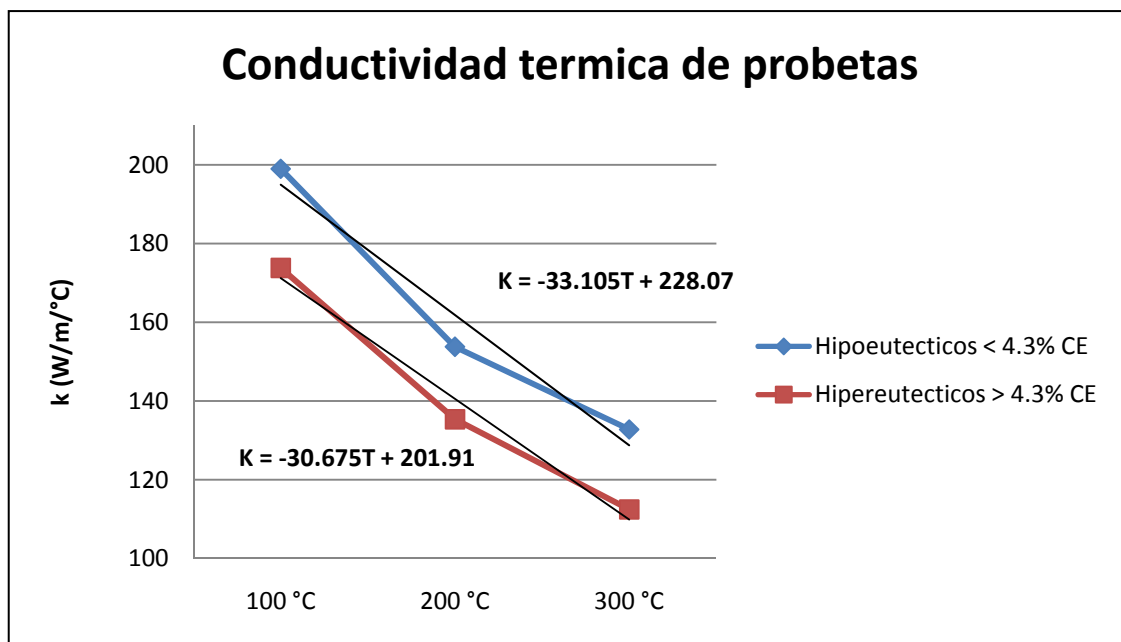


Figura 5.12 Conductividad térmica experimental promedio de la muestras de hierro hipereutéctico e hipoeutéctico

De acuerdo a los resultados obtenidos experimentalmente podemos obtener los siguientes resultados.

Los hierros hipoeutéticos muestran una mejor conductividad térmica y esto es debido a la concentración de los aleantes que presentan. Al tener bajo contenido de Cu en comparación con el hierro hipereutético en este caso la conductividad térmica no se afecta, la concentración de Ni de igual manera es baja menor al 1% por lo cual no afecta en gran medida a la conductividad. Para el caso del Cr la concentración es mayor, esto favorece la conductividad ya que al ser un estabilizador de carburos este recorre las fases de esta forma se prueba la teoría de Donaldson ya que afirma que un aumento en Cr representa un aumento en la conductividad.

A continuación en la tabla 5.9, se muestra el comparativo de estos 3 elementos Ni, Cu y Cr que influyen en la dispersión térmica.

%	Hipereutético Disp. Ter. ↓	Hipoeutético Disp. Ter. ↑
% Ni	0.072 ↑	0.02 ↓
% Cu	0.15 ↑	0.10 ↓
% Cr	0.11 ↓	0.20 ↑

Tabla 5.9 Comparativo del Ni, Cu y Cr entre hipereutético e hipoeutético

En este caso además de presentar una mejor conductividad térmica el hierro hipoeutéticos debido a la adecuada concentración de los aleantes, presenta mejores propiedades mecánicas debido a la baja concentración de Si en comparación con el hierro hipereutético en estudio.

%	Hipereutético P.Mec ↓	Hipoeutético P. Mec ↑
% C	3.65 ↑	3.55 ↓
% Si	2.04 ↑	1.9 ↓
%P	0.15	0.15
% C _E	4.38 ↑	4.23 ↓

Tabla 5.10 Comparativo entre elementos que forman el CE

El hierro Hipoeutético al tener menor concentración de Carbono equivalente sus propiedades mecánicas como dureza y resistencia a la tensión aumenta (Figura 5.5), con lo cual obtenemos un diseño adecuado de aleación.

CONCLUSIONES

1. Se fabricaron a nivel laboratorio discos de freno de hierro gris hiperutéticos (usados para este tipo de autopartes) con la finalidad de comparar las diferencias microestructurales presentes en cada tipo de hierro fabricado.
2. Los discos con carbono equivalente mayores a 4.30% presentaron una disminución en la resistencia mecánica y dureza brinell, también se incremento la formación de ferrita fase no deseada en esta pieza automotriz y la morfología de los grafitos que se presentaron fue de tipo C con tipo A en una relación de 50:50.
3. Los discos con carbono equivalente entre 4.40% y 4.50% obtenidos presentaron disminucion de sus propiedades mecánicas las cuales estan dentro de los especificadas por las normas que gobiernan al tipo de hierros que se usan para la fabricación de discos de freno industriales.
4. La composición química y el tratamiento de los hierros durante la colada (inoculación y velocidad de enfriamiento) fueron factores determinantes para la formación de las microestructuras obtenidas.
5. Se observó una influencia marcada de los contenidos de silicio entre 1.70% y 2.06% sobre la morfología (forma y tamaño) de las hojuelas de los grafitos tipo A obteniendose tamaños 3, 4 y 5 distribuidas sin una orientación definida en toda la matriz del hierro deseables para estos hierros.
6. A mayores contenidos de carbono las propiedades mecánicas aumentan al cambiar la microestructura por el efecto de este promoviendo la formación de grafitos tipo C al rebasar las concentraciones de carbono >3.78% en el hierro.
7. La adición de cobre mejoró las propiedades mecánicas en los hierros fabricados, principalmente la resistencia, mientras que el Silicio debido a su poder grafitizante tiende a disminuirlas en los discos de freno fabricados.
8. El estudio de termografía infrarroja es una herramienta útil para determinar los perfiles de temperatura espacial y temporal sobre el rotor. Estos perfiles nos permiten obtener las temperaturas máximas en cada episodio de frenado, la existencia de los anillos calientes, la ganancia y la pérdida de calor. Los resultados en conjunto mostrados en este trabajo se pueden utilizar para mejorar el rendimiento y el diseño rotores de freno ventilados.

RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

1. Pruebas de desgaste y determinación de coeficientes de fricción de las aleaciones diseñadas.
2. Añadir al diseño contenido de molibdeno en la aleación.
3. Caracterización térmica de las aleaciones diseñadas por termografía infrarroja en pruebas dinamométricas con episodios severos de frenado.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Fred, Puhn. Brake Handbook, HPBooks, 1985
2. Pompon, Jean Paul. Manual de disco de freno. Brake System BREMBO, S.A. de C.V., 1997
3. Esteban Cañibano, Manuel González, Diseño de disco de frenos desde un punto de vista multidisciplinar. Fundación CIDAUT, Parque tecnológico Valladolid, 2005
4. Jean Paul Pompon, Manual del Disco de Freno. Edit. CEAC. Págs. 38-51.
5. A.M. LANG, H. SMALES, An approach to the solution of disc brake vibration problems. Paper C37, Mechanical Engineering. Conference on braking of road vehicles, 1983.
6. M.R. NORTH. Disc brake squeal, Paper C38. Mechanical Engineering. Conference on braking of road vehicles, 1976.
7. Martínez Krahmer, Optimización del diseño en discos de freno para competición, Instituto Nacional de Tecnología Industrial, 2000.
8. Larry Carley, Disc Brake Rotors: The science behind their design, 2003
9. SAE (Society of Automotive Engineers, inc) An Investigative Overview of Automotive Disc Brake Noise 1999-01-0142, 1999
10. N. MILLNER, An analysis of disc brake squeal, SAE paper 780332, Detroit 1978.
11. J.R. Barber, The effect of thermal distortion on constriction resistance, University of Newcastle, 1990.
12. Miakoff, I. The Physical Metallurgy of Cast Iron, John Wiley & Sons Ltd., Norwich 1983
13. Elliot, Ray, Cast Iron Technology, Butterworth & Co., Great Britain 1988
14. Neumann, F. Recent Research on Cast Iron, Gordon and Breach, New York, 1968.
15. Atlas of Microstructures of Industrial Alloys, Metals Handbook; pp. 81-100
16. Manuel Vega, Fundiciones grises aleadas de alta resistencia, Universidad de Montevideo, 2000.
17. Laplanche, H. Metal Program 52(6), 1947, Pag. 991.
18. Pat L. Mangonon, Ciencia de Materiales Selección y Diseño. Prentice, México 2001. Pags. 429-457.
19. Piwowarsky, E.: Hochwertiges Gusseisen, 2nd ed., Springer-Verlag. 1958
20. ASM Committee, Alloy Cast Irons, 1998
21. Stefanescu, Doru M. Classification of ferrous casting alloys", Metals Handbook Ninth Edition, Vol. 15 Casting, ASM 1998
22. Bates, C. "Effect of alloy elements on the strength and microstructure of gray cast iron". AFS Transactions (1984), V. 92, P. 923.
23. Stefanescu, Doru M. Cast Iron, Metals Handbook Ninth Edition, Vol. 15 Casting, ASM 1998
24. Avner, Sydney H. Introducción a la Metalurgia Física, McGraw Hill, México 1981
25. Elliott Roy BSc, Ph. D, "CAST IRON TECHNOLOGY" 1° ed., Edit. Butterworths & Co Ltd., Great Britain 1988, pp. 1-36.
26. Metallography, Structures and Phase Diagrams, Metals Handbook. Pags 250, 275, 302, 408, 416.
27. Hilliard, J.E., and W.S. Owen: Iron Steel Institute London, 1952. Pags 172, 268.
28. Dawson, J.U. The Future role of inoculation Technology, BCIRA, 1970

29. Maurer, E.: *Stahl Eisen*, 1924. Pags 44, 1522.
30. Metallography, Structures and Phase Diagrams, Metals Handbook., Pags 275-278.
31. Hillert, M., and H. Steinhauser: *Jernkontorets Ann*, 1960. Pags 144, 520.
32. Patterson, W., and R. Döpp: *Giessereiforschung* (in English.), 1969. Pags 21, 91.
33. Cahn, J. W., and W. C. Hagel: *Decomposition of Austenite by Diffusional Processes* (Eds. V. F. Zakay and H. I. Aaronson), Wiley-Interscience. New York, 1962. Pag 131.
34. Hillert, M.: *Phase Transformations*, American Society Metallurgy. 1970. Pag 181.
35. Benedick, C: *Intern. Z. Metallographic*, 1978. Pags 184, 1978.
36. Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings, ASTM A247-67, 1998
37. Fras. E. "Theoretical basis of the grain growth of irregular eutectics". *Archiwum Autnictwa*, 1984. Pag. 74.
38. E. Paul Degarmo, J.T. Black, Ronald A. Kohser, Barney E. Klamecki, *Materials and Processes in Manufacturing*. 9th ed. WILEY U.S.A.
39. ANSI/ASTM A159-77 "Standard Specification for AUTOMOTIVE GRAY IRON CASTINGS". Pags. 113-140.
40. H.T. Angus, *CAST IRON Physical and Engineering Properties*. Butler & Tannen Ltd. London England 1975.
41. José Apraiz Barreiro "Fundiciones" 6a ed., Edit. LIMUSA. Págs. 71-90.
42. Sydney H. Avner, *Introducción a la Metalurgia Física*, 2° Ed. Edit. Mc Graw Hill. Págs. 433-446.
43. Fras, E., Serrano, J.L., Bustos, A. "Fundiciones de Hierro", Instituto Tecnológico de Saltillo. 1990
44. José Luis Rodríguez. *Diseño y fabricación de hierros grises hipereutéticos de baja aleación para discos de frenos*, ESIQIE-IPN, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, 2009.
45. Krause, D.E., "Gray Iron-A Unique Engineering Material" Gray, Ductile, and Malleable Iron Castings-Current Capabilities, ASTM STP 455, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1969, pp. 3-28
46. Campbell John, OBE, Feng. "CASTINGS", edit. Butterworth-Heinemann. Págs. 27-82.
47. *Metals Handbook Ninth Edition Vol-1*; pp. 3-106.
48. R. W. K. Steels. *Microstructure and properties*, Spottiswoode Ballantyne Ltd, Colchester, 1981
49. SAE (Society of Automotive Engineers, Inc) *Handbook* 1978, part-1, Ferrous casting.
50. *Metals Handbook Ninth Edition Vol-15*; pp. 626-739.
51. ASTM E10-01 Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials, 2004
52. ASTM G65-00 Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, 2000
53. Pat L. Mangonon, *Ciencia de Materiales Selección y Diseño*. Prentice, México 2001.
54. Gustavo Tovar S. *Análisis de falla de componentes de ingeniería*, Universidad de los Andes, 1999
55. Howard Kuhn, *Mechanical Testing and Evaluation*, ASM Metal Handbook, Vol. 8, 2000
56. ASTM E8M-04, Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Material Metric, 2008.

57. M.H.Cho, S.J.Kim, R.H.Basch, J.W.Fash, H.Jang, Tribological study of gray cast iron with automotive brake linings: The effect of rotor microstructure. Elsevier Science Ltd.2003 South Korea, Tribology International.
58. Wagner, C.: Thermodynamics of Alloys, Addison-Wesley, 1952.
59. Donaldson, J.W. Institute Mechanical Engineering 2.1920. Pags 953-983
60. Söhnchen, E Arch Eisenhüttenwesen,1934. Pags 223-229

APENDICE 1

NORMA ASTM A-247 Método de ensayo normalizado para la evaluación de la microestructura del grafito en hierros grises

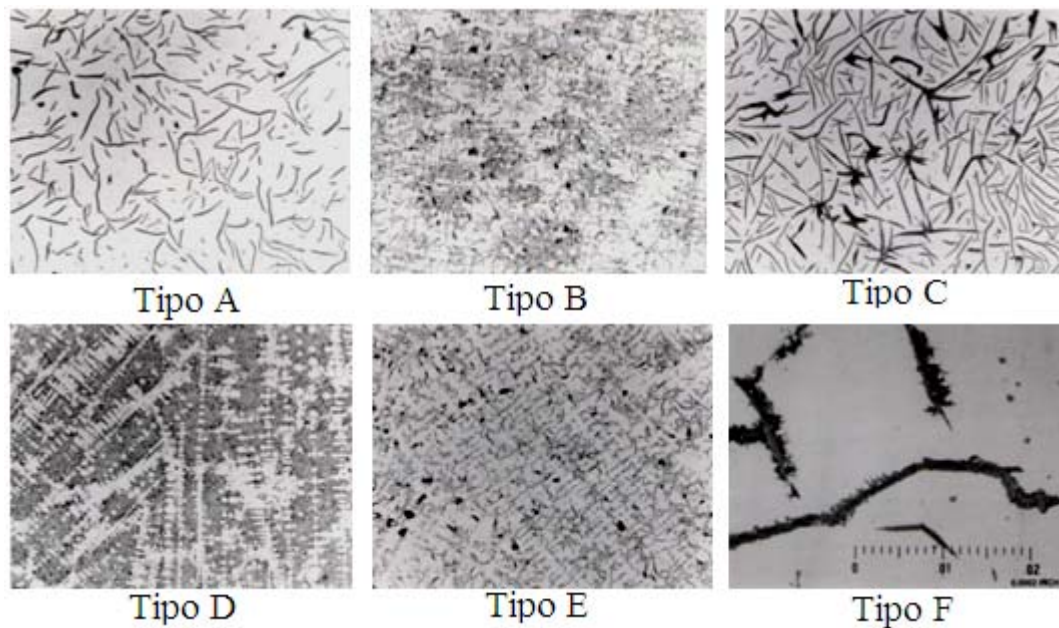


Figura. A1.1 Distribución del grafito según ASTM A-247.

Distribución del grafito según ASTM A 247.

- Tipo A. La distribución del grafito se caracteriza por una distribución uniforme de las hojuelas y sin una orientación ordenada.
- Tipo B. La distribución del grafito se caracteriza por formar grupos de rosetas y sin una orientación ordenada.
- Tipo C. La distribución del grafito se caracteriza por hojuelas grandes superpuestas entre si y sin una orientación ordenada.
- Tipo D. La distribución del grafito se caracteriza por presentar segregación ínter dendrítica y sin una orientación ordenada.
- Tipo E. La distribución del grafito se caracteriza por presentar segregación ínter dendrítica y con una orientación preferida

Los tamaños se señalan con números del 2 al 7 para hierro gris en la Fig. A2

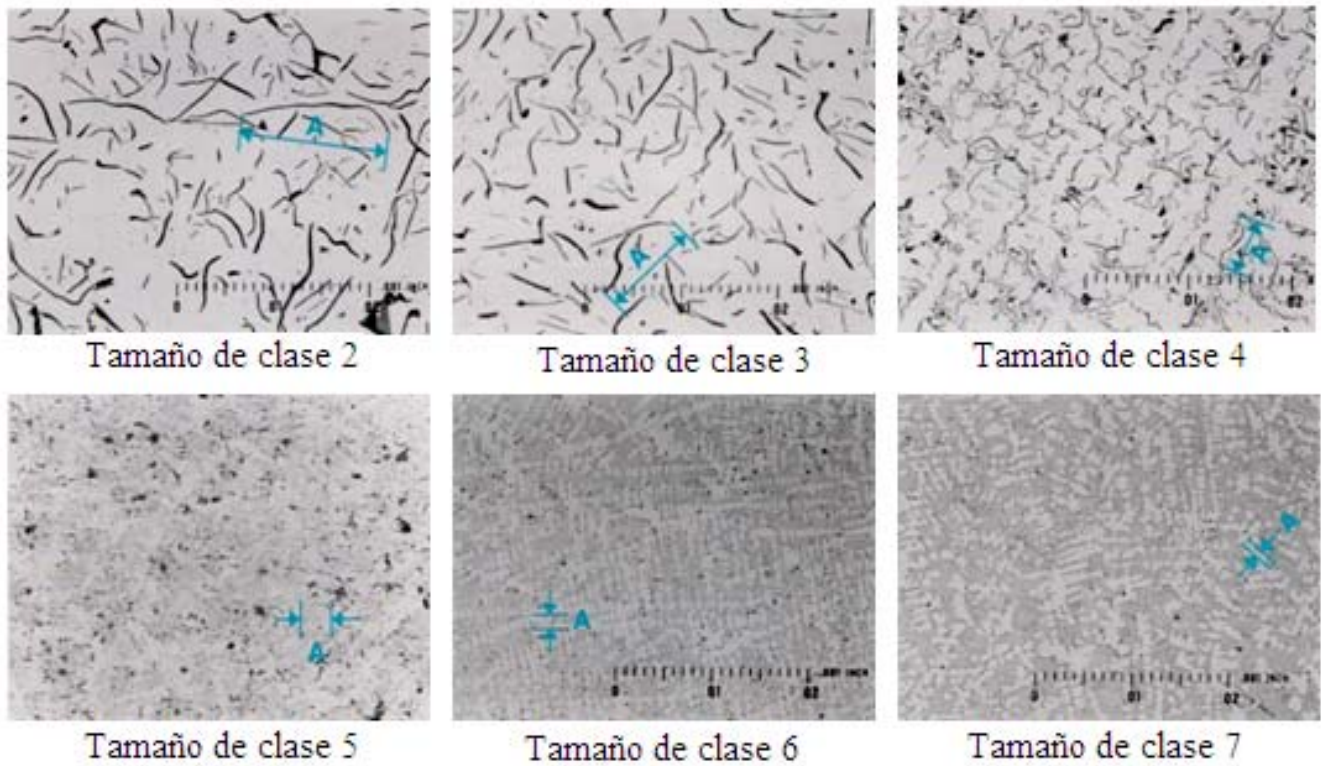


Figura. A1.2 Tamaños de hojuelas de grafito según ASTM A-247.

Tabla A1.1 Tamaño de las hojuelas en mm según ASTM A 247.

Tamaño Clase	A (mm)
2	40
3	27
4	14
5	7
6	3.5
7	2

Tabla A1.1 Tamaño de las hojuelas en mm según ASTM A 247.

Los tamaños de las hojuelas de grafito generalmente se determinan por comparación visual de los tamaños estándar preparados conjuntamente por la norma ASTM A 247 y están mencionados en la tabla A1.2.

Tamaño Clase	Máxima dimensión a 100x A (mm)
1	128
2	64
3	32
4	16
5	8
6	4
7	2
8	1

Tabla A1.2 Longitud de las hojuelas de grafito a 100x, de acuerdo a la ASTM A-247.

APENDICE 2 PUBLICACIONES GENERADAS DURANTE EL PRESENTE TRABAJO



"THERMAL CHARACTERIZATION OF A GRAY CAST IRON VENTED BRAKE ROTOR DURING SEVERE-BRAKING USING INFRARED THERMOGRAPHY"

Mena Eric, Gutiérrez Juliana, Garrido Omar, Jiménez Roberto, Pérez Abraham and Ortega Miguel

Department of Mechanical and Materials Engineering
Av. De las Granjas 682, Col. Sta. Catarina, C.P. 02250
Mexico City, Mexico
E-mail: ggutierrezp@ipn.mx



ABSTRACT

High resolution infrared thermography was used to analyze the thermal response of a vented brake disk (made of gray cast iron) during sudden braking. This research was conducted to test brake rotors made of a new gray iron alloy. Experience with current rotors has shown the formation of cracks due to thermal stresses developed during braking episodes. Such crack results in the shortening of the service life of the brake rotor but also and most importantly they may constitute a safety risk to the people using a vehicle with damaged brake rotors. Results from the thermal characterization reveal that our approach to minimize cracking during braking episodes is the correct one.

INTRODUCTION

The dynamical interaction between the brake and pad was analyzed by using infrared thermography of high resolution. A gray cast iron vented brake rotor is exposed to strong frictional stresses during severe braking episodes. Due to it, maximum temperatures near 700 °C can be attained during a sudden braking in a few seconds.

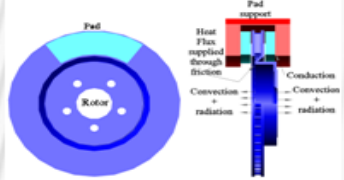


Figure 1. Rotor brake and pad assembly and the mechanisms involved in transforming the kinetic energy of the moving vehicle into heat.

$$E = \frac{K}{2} \cdot \gamma \cdot \frac{m(v_i - v_f)}{2}$$

$$Q = c_p \cdot m \cdot \Delta T_{brake} + Q_{rad} + Q_{con} + Q_{con}$$

$$Q = Q_{brake} + Q_{con} + Q_{con} + Q_{rad}$$

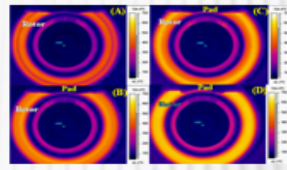


Figure 4. Infrared thermographic of the maximum temperature distribution during braking. Corresponding to point (A)-(D) of the plot in Figure 5. Notice that the more uniform temperature is attained in the last braking episode (D).

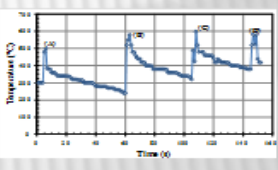


Figure 5. Evolution of average temperatures for a series of braking episodes (peaks). Temperature values were obtained from the infrared images.

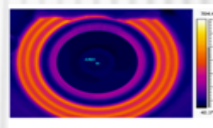


Figure 6. Temperature profile along the line 1 in the instant of maximum surface temperature on the brake rotor. Notice the strong temperature increase respect to the temperature in between rings.

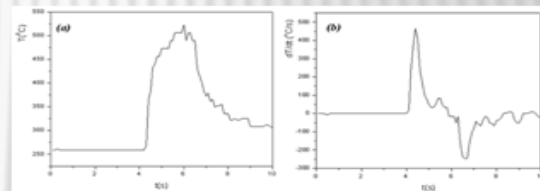


Figure 7. (a) Functional change of the maximum temperature as a function of time during a braking episode. (b) Temporal derivative dT/dt for the profile given in (a). This quantity is proportional to the energy.

EXPERIMENTAL PROCEDURE

- Alloy and foundry
- Mechanical testing
- Non-destructive inspection
- Braking Dynamometric
- Thermography




Figure 2. Result from the non-destructive testing on a brake rotor removed from service.

Figure 3. Transversal cut of a rotor brake showing the generation of a crack developed onto the rotor's surface.

RESULTS AND DISCUSSION

Alloy	Brinell Hardness (HB)	Tensile Strength (MPa)
Current	200	240
Proposed	248	300

Table 1. Result from the mechanical evaluation of the alloy tested.

CONCLUSIONS

We have shown that infrared thermography is a very useful tool to determine accurate spatial and temporal temperature profiles.

These profiles allows us to obtain valuable information as the maxima temperatures in each braking episode, the existence of hot rings, the gain and lost of heat and the importance of these events upon the compositional and mechanical properties.

The overall results given here can be used to improve the performance and to design of vented break rotors.

Authors would like to give acknowledgements to COFAA-IPN for the financial support thought the project SIP 20090785. G.G.J also wish to thank the help of her colleagues Profs. Fausto Sánchez and Abraham Medina.

ESTUDIO POR TERMOGRAFÍA INFRARROJA DE LA EVOLUCIÓN TÉRMICA DE UN DISCO AUTOMOTRIZ VENTILADO DURANTE EPISODIOS SEVEROS DE FRENADO

E. Mena, G.J. Gutiérrez, O. Garrido, R. Jiménez,
SEPI-ESIME-UA, Instituto Politécnico Nacional
Av. de las Granjas 682, Col. Sta. Catarina,
México C.P. 02250, México
E-mail: gguierrezp@ipn.mx

Resumen

Para desarrollar este estudio se empleo termografía infrarroja de alta resolución, con la finalidad de analizar la respuesta térmica que un disco ventilado de freno automotriz durante la etapa de frenado súbito. La experiencia con los rotores (discos) actuales muestra la formación de grietas debido a los esfuerzos térmicos, mecánicos y a las transiciones de fase desarrollados durante los episodios de frenado. La aparición de tales grietas da como resultado la reducción de vida en servicio de los rotores de freno y pueden constituir un riesgo a la seguridad del conductor usando un vehículo con rotores de freno dañados. El resultado de la caracterización térmica revela que nuestro diseño para minimizar el agrietamiento durante los episodios de frenado es el correcto.

Abstract

In this study high resolution infrared thermography was used to analyze the thermal response of a automotive vented brake disk. Experiences with current rotors have shown the formation of cracks due to thermal and mechanical stresses, and phase transformations developed during braking episodes. The crack is detrimental to the integrity of this type of critical components, moreover, such defects may induce catastrophic failures. The result of thermal characterization shows that our design to minimize the cracks during a breaking episode is right

Palabras Clave: Rotor de freno; Termografía infrarroja; Esfuerzos térmicos

Key words: Brake rotor; Infrared thermography; Thermal stresses.

1. Introducción

Los sistemas de freno en la industria automotriz son una de las áreas más importantes de la manufactura de automóviles debido a los problemas de seguridad inherentes a ellos. Estos sistemas están constituidos por varios componentes mecánicos, entre ellos un rotor de freno que está montado a los neumáticos y un caliper que sostiene a las balatas, cuya función es aplicar presión al rotor de freno para detener el movimiento del vehículo.

En términos de su operación, el sistema de freno debe extraer la energía cinética de un vehículo en movimiento mediante la fricción entre la balata y el rotor de freno para desacelerar o parar del todo al vehículo. Esto significa que la mayor parte de energía cinética del movimiento del vehículo debe de ser transformada en calor y este calor es absorbido por el rotor de freno.

Uno de los principales fines de este trabajo es cuantificar los flujos de calor e inferir cómo estos flujos modifican al material.

El conocimiento de estos detalles permitirá en estudios posteriores mejorar las composiciones de los discos de freno y su desempeño.

2. Motivación

Se sabe que en discos ventilados un rotor de frenos de hierro gris es expuesto a enormes esfuerzos friccionales durante los episodios de frenado. Debido a esto, la temperatura máxima alcanzada es cercana a los 700°C durante un frenado súbito de unos cuantos segundos [1,2]. La distribución de temperatura desarrollada bajo esas condiciones es compleja, los esfuerzos térmicos y las transformaciones de fase que producen daños en el rotor como el agrietamiento.

A través de estudios previos se sabe que un rotor ventilado y un diseño óptimo del material (ver Fig. 1), ayudan sustancialmente a reducir los daños por agrietamiento térmico. En este estudio nos enfocamos a conocer los súbitos incrementos en temperatura y su

distribución espacial en la pista de frenado bajo condiciones severas.

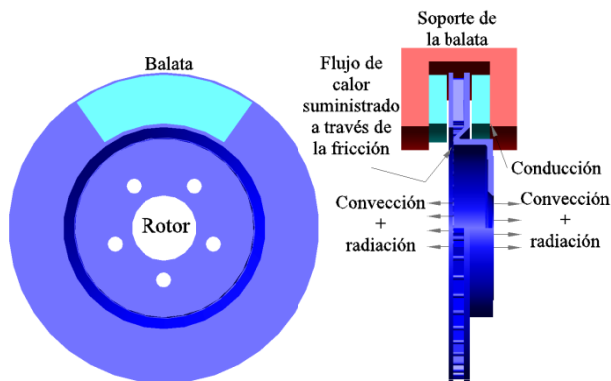


Fig. 1 Ensamble del rotor de freno y la balata, y mecanismos involucrados en la transformación de energía cinética del vehículo en movimiento a calor.

La cuantificación de las temperaturas máximas así como de las velocidades de ganancia y disipación de calor nos ayudaran a mejorar el diseño del rotor y a cuantificar las demandas térmicas bajo un diseño específico. Mostraremos también que la termografía infrarroja es una herramienta de inspección no destructiva que es excelente para estimar diversas propiedades de los mecanismos de disipación de calor de los discos.

3. Desarrollo Experimental

Para verificar el efecto de los cambios en composición química propuestos, nosotros conducimos nuestra investigación en varios pasos, es decir:

- Pruebas mecánicas
- Inspección no destructiva
- Termografía

Pruebas Mecánicas

El esfuerzo de tensión, El numero de dureza Brinell junto con las características metalografías de ambas aleaciones fueron determinadas de acuerdo con las normas SAE J431/ASTM 159. Los valores obtenidos para el esfuerzo de tensión y del número de dureza Brinell son mostrados en la sección de resultados. Las características metalografías de las aleaciones también se muestran en la siguiente sección.

Inspección no destructiva

La inspección de líquidos penetrantes se llevo a cabo en los frenos de rotor hecho de la aleación actual. Esta evaluación no destructiva fue usada para determinar si se desarrollo alguna grieta o micro grieta en la superficie del rotor después de simular un episodio de frenado.

La inspección de líquidos penetrantes revelo la cantidad, tamaño y distribución de las diferentes grietas formadas sobre las muestras.

Termografía

El rotor de frenos fue ensamblado en una prueba (dinamómetro) de tal manera que el rotor y la balata estén completamente expuestos a una cámara infrarroja. Al rotor se le permitió rotar a 2000RPM y de manera súbita un episodio de frenado fue impuesto. Imágenes del calentamiento de la superficie del rotor se tomaron continuamente en intervalos de 0.2 s. Las imágenes digitales obtenidas con la cámara nos permiten analizar la distribución de temperaturas superficiales en el rotor y estimar el conjunto de flujos de calor que participan durante el frenado, tanto espacial como temporalmente.

4. Resultados y Discusión

Los resultados de las propiedades mecánicas de las aleaciones se muestran en la Tabla 1. Los datos reportados en dicha tabla, para la aleación común, cumplen con las normas SAE J431/ASTM 159, mientras que los datos obtenidos para las aleaciones propuestas están fuera de esas normas, sin embargo, la aleación propuesta muestra mejores propiedades mecánicas en función de la dureza y la resistencia a la tracción. Esto último indica que las aleaciones sugeridas en esta investigación son capaces de soportar tensiones mayores.

Tabla 1. Resultados de la evaluación mecánica de las aleaciones de prueba.

Aleación	Dureza Brinell (HB)	Resistencia a la tracción (MPa)
Común	200	240
Propuesta	248	300

Además, el examen metalográfico de ambas aleaciones muestra una mejor distribución de fase en el caso de las aleaciones propuestas que las otras. Las hojuelas de grafito en la aleación propuesta (ver Fig. 2B), están distribuidas al azar en toda la matriz perlítica de la aleación y estas también muestran un tamaño uniforme; mientras que en el caso de la aleación común utilizada (ver Fig. 2A), es evidente una forma y tamaño irregular de las hojuelas de grafito, además de un alojamiento menos aleatoria de las hojuelas.

Tales características metalográficas exhibidas por la aleación propuesta junto con las propiedades térmicas evaluadas en ellas nos permiten asegurar un mejor funcionamiento de esta aleación bajo condiciones mecánicas estrictas, en otras palabras, la microestructura

de esta nueva aleación asegura un mejores propiedades mecánicas por lo tanto una mayor capacidad para soportar mayores tensiones.

En términos de los ensayos no destructivos, se realizó en un rotor de freno dañado. (Ver Fig. 3), muestra una imagen de la inspección una vez que los líquidos penetrantes fueron revelados. Se puede ver en la imagen del lado derecho de la Fig. 3 el desarrollo de varias micro grietas a lo largo de la superficie del rotor de freno.

Por otra parte, se muestra que las grietas se desarrollan dentro del rotor de freno hacia el interior del componente alcanzando hasta 2.5 cm de profundidad (ver Fig. 4). Tal tamaño de la fisura es perjudicial para la integridad de este tipo de componentes críticos, más aún, estos defectos pueden inducir una falla catastrófica en cualquier momento dado.

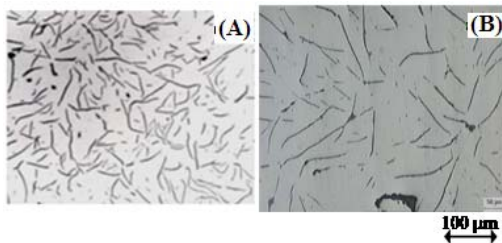


Fig. 2 (A) Micrografía de la aleación utilizada actualmente en la fabricación de rotores de freno, (B) Micrografía de la aleación propuesta.

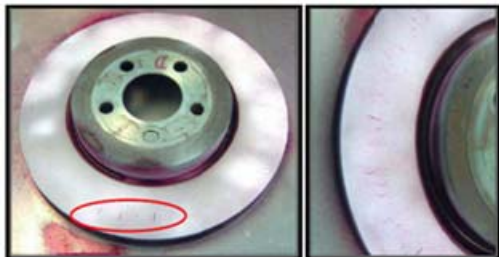


Fig. 3 Resultado de la prueba no destructiva en un rotor de freno fuera de servicio.

Estas fisuras son el resultado de la interacción termo-mecánica entre el rotor y la balata. Se espera que por la fricción entre estos componentes se desarrollen algunos esfuerzos localizados a lo largo de la superficie de contacto. Además de la interacción mecánica, la fricción entre la balata y el rotor también genera calor. El calentamiento del rotor es más evidente en el caso de un frenado de emergencia.

Los frenos de rotor fueron ensamblados en una prueba de banco (dinamómetro) de tal manera que tanto el rotor como la balata estuvieran totalmente expuestos a una cámara de infrarrojos de alta resolución. Al rotor se le impulsó a una velocidad de rotación de 2000 RPM y

súbitamente fueron impuestos episodios de frenado. Se muestra la grafica de la temperatura media en la superficie en función del tiempo de una sucesión de episodios de frenado (ver Fig. 5).

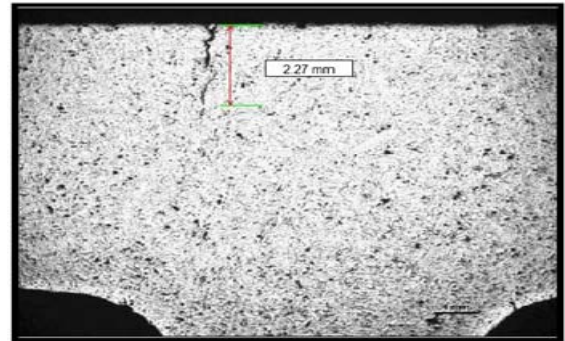


Fig. 4 Corte transversal de un freno de rotor que muestra la penetración de la fisura desarrollada dentro de la superficie del rotor.

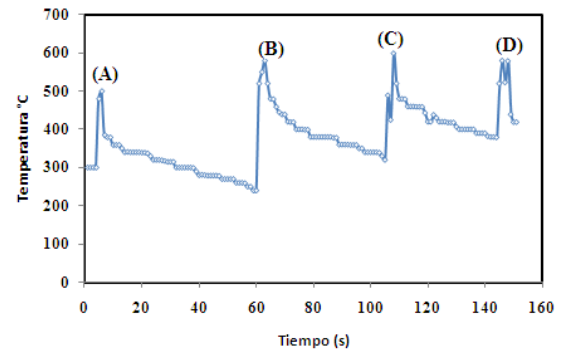


Fig. 5 Evolución de las temperaturas promedio para una serie de episodios de frenado (picos). Los valores de temperatura se obtuvieron de las imágenes infrarrojas.

Se muestran cuatro instantáneas de las temperaturas máximas (ver Fig. 6) indicadas en la grafica de la Figura 5. Observe que el episodio (D) su termografía muestra un calentamiento muy uniforme. Las termografías infrarrojas fueron obtenidas con una cámara digital de infrarrojos modelo FLIR-T710 que detecta diferencias de temperatura de hasta 0.08 °C.

Por cierto, imágenes infrarrojas representativas del calentamiento del rotor durante el frenado se muestran en la Fig. 7. Estas imágenes corresponden al episodio denominado (A) en la Fig. 5. En este caso, las fotos instantáneas fueron tomadas cada 1/15 s. En la Fig. 7 tres etapas importantes de temperaturas son mostradas: (a) antes, (b) durante y (c) después del frenado súbito. Las imágenes también tienen una alta resolución. Este detalle nos permite obtener información precisa de la distribución de temperatura en la superficie del rotor y de estimar, mediante el empleo de análisis de imágenes digitales, los fenómenos importantes que ocurren durante el frenado: por ejemplo, en la Fig. 7(b) se observa que durante el frenado, en el instante de la temperatura máxima, hay tres anillos que indican un contacto

friccionarte no uniforme y, por consiguiente, una disminución de la superficie de contacto efectivo de la balata con el rotor.

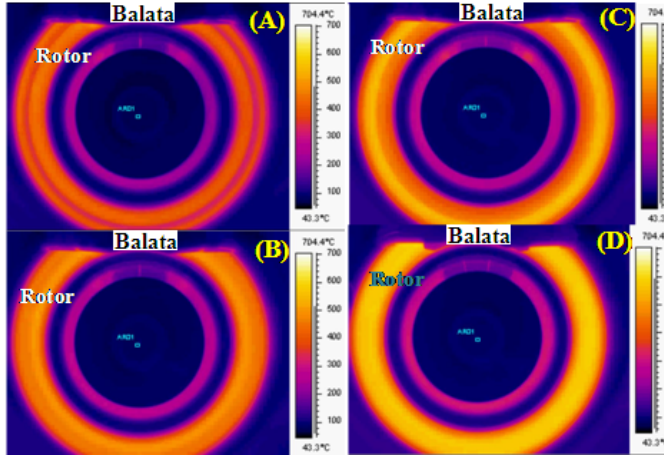


Fig. 6 Termografías infrarrojas de la distribución de temperaturas máximas durante el frenado, correspondiente a los puntos (A)-(D) en la gráfica de la figura 5. Observe que la temperatura más uniforme se alcanza en el último episodio de frenado (D).

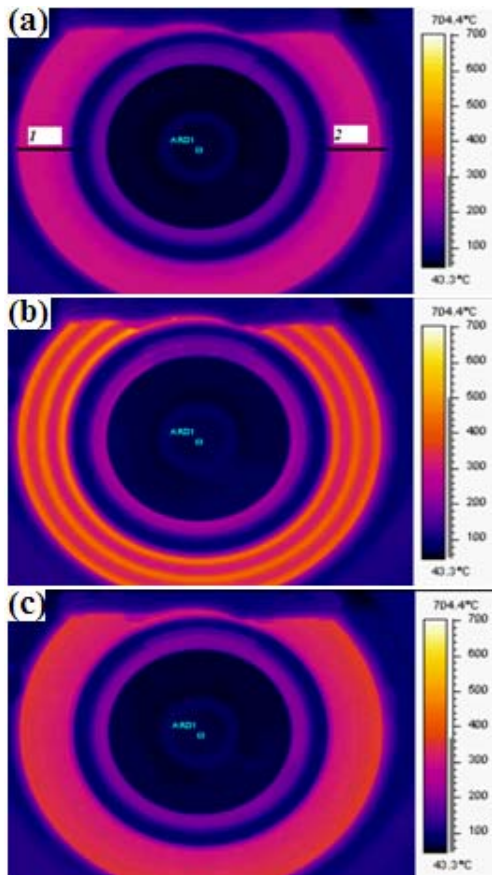


Fig. 7 Instantáneas térmicas del frenado: (a) Termografía previa al frenado, (b) Termografía que pone en evidencia tres puntos de calentamiento radial (c) distribución de temperaturas uniforme cuando el rotor gira a una constante velocidad angular.

Una estimación cuantitativa de los valores de temperatura en esos anillos se muestra en la Figura 8 donde el tamaño de los anillos puede estimarse en 10 mm cada uno. Las dimensiones del tamaño de estas estructuras pueden ser útiles para estimar de manera real el radio del área real y el área de contacto aparente, $R = A_r/A_a$ [2]. En este caso se ha estimado que $R = 0.50$.

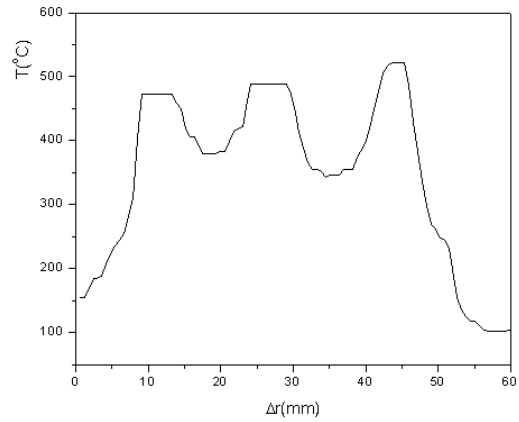


Fig. 8 El perfil de temperatura a lo largo de la línea 1 indicada en la (Fig. 7(a)) en el instante de la temperatura superficial máxima en el rotor de freno (Fig. 7(b)). Observe el fuerte aumento de la temperatura respecto a la temperatura entre los anillos.

Según recientes estudios teóricos [2], es posible establecer que, en este episodio, el valor de R da la máxima temperatura T_{max} , porque se produce un aumento de temperatura con una disminución a la relación del área de contacto. Este resultado podría ser útil para mejorar el diseño de la composición y el funcionamiento del rotor y la balata.

Por otra parte, cuando la temperatura del sólido es uniforme en el espacio es posible estimar el almacenamiento de energía (perdida) en el rotor durante cada episodio de frenado, es dado como [1]:

$$\dot{E} = mc \frac{dT}{dt}, \quad (1)$$

donde, m es la masa del rotor y c es el calor específico del material. La derivada respecto al tiempo T es proporcional a tal energía. Se muestra el perfil de temperatura superficial máxima durante el episodio de frenado y su gráfica de dT/dt como una función del tiempo se da en la Fig. 9(b). De la gráfica (ver Fig. 9(b)) es evidente que durante el frenado el rotor tenga ganancias de energía (valores positivos dT/dt) de un modo suave debido al rozamiento pero la pérdida de energía térmica en forma discontinua, principalmente a

través de la conducción y el mecanismos de radiación y después a través de la convección porque a altas velocidades este es el principal mecanismo de pérdida de calor [3-7].

También, la termografía infrarroja revela correctamente que a altas velocidades (antes y después del episodio de frenado) la temperatura es ligeramente superior en el lado derecho respecto al izquierdo (Ver Fig. 10). Esto significa que en la mitad de una revolución el rotor pierde calor, por el mecanismo de convección, esto es alrededor de 10 °C. Se puede concluir que en este último caso, las aletas ayudan a enfriar eficientemente al rotor.

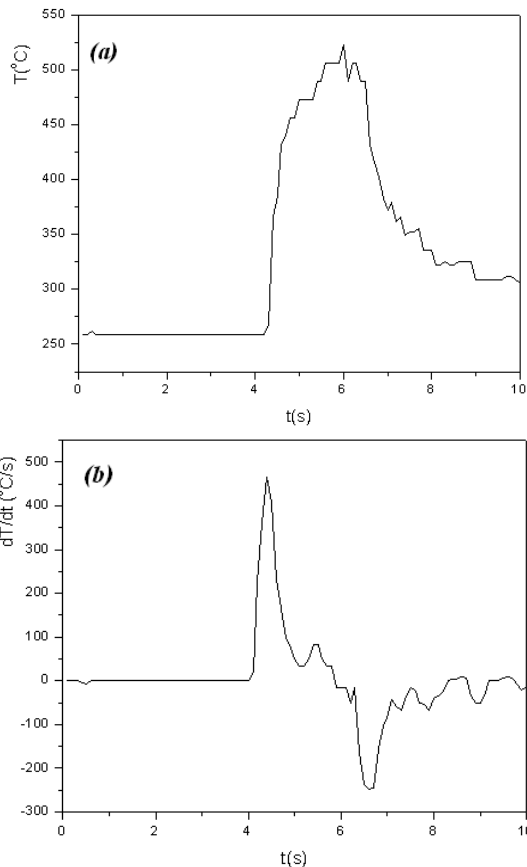


Fig. 9 (a) El cambio puntal de la temperatura máxima en función del tiempo durante el episodio de frenado. (b) derivada temporal dT/dt para el perfil dado en (a). Esta cantidad es proporcional a la energía.

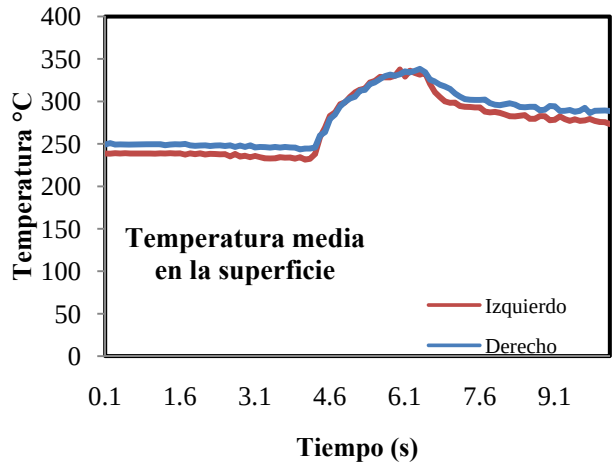


Fig. 10 Temperatura superficial promedio lado izquierdo (rojo) y lado derecho (azul) del rotor.

5. Conclusiones

En este trabajo presentamos un estudio en el mostramos que la termografía infrarroja es una herramienta útil para determinar con precisión los perfiles de temperatura espacial y temporal sobre el rotor. Estos perfiles nos permiten obtener información valiosa como las temperaturas máximas en cada episodio de frenado, la existencia de los anillos calientes, la ganancia y la pérdida de calor y la importancia de estos eventos en la composición y propiedades mecánicas. Los resultados en conjunto mostrados en este trabajo se pueden utilizar para mejorar el rendimiento y el diseño rotores de freno ventilados.

Reconocimientos

Los autores agradecen a COFAA-IPN por el apoyo financiero a través del proyecto SIP 20090785. G.G.J. desea agradecer la ayuda de sus colegas, Drs. Fausto Sánchez y Abraham Medina.

Bibliografía

- [1] Mena Pérez, E. Tesis de licenciatura, ESIME UA IPN México, 2010.
- [2] Thevenet, J., Siroux, M., Desmet, B., Brake disc surface temperature measurement using a fiber optic two-color pyrometer, *"Proceedings of the 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography"*, Krakow - Poland July 2-5, 2008.
- [3] Qi, H.S., Day, A.J., Investigation of disc/pad interface temperatures in friction braking, *"Wear"*, Vol. 262, 2007, pp. 505–513
- [4] A.D. McPhee, D.A. Johnson, Experimental heat transfer and flow analysis of a vented brake rotor, *"International Journal of Thermal Sciences"*, Vol. 47, 2008, pp. 458–467
- [5] Ji-Hoon Choi, In Lee., Finite element analysis of transient thermo elastic behaviors in disk brakes, *"Elsevier Wear"*, Vol. 257, 2004, pp. 47–58
- [6] F. Talati and S. Jalalifar., Investigation of Heat Transfers Phenomena un a Ventilated Disk Brake Rotor with Straight Radial Rounded Vanes, *"J. Applied Sci."*, Vol. 8, 2008, pp 3583 – 3592
- [7] Zhongzhe Chi, Greg F. Naterer and Yuping He., Effects of Brake Disk Geometrical Parameters and Configurations on Automotive Braking Thermal Performace, *"Transactions of the CSME Ide fa SCGM"*, Vol. 32, 2008, pp 313- 324.

NOMENCLATURA

E	[J]	Energía cinética transferida de un vehículo en movimiento al rotor de freno
K	[-]	Fracción de energía cinética absorbida por el rotor de freno
M	[kg]	Masa del vehículo, masa del rotor
V	[m/s]	Velocidad del vehículo
Q	[J]	Calor
C_p	[J/kgK]	Calor específico
T	[°C]	Temperatura
t	[s]	Tiempo
R	[mm]	Radio del área de contacto real y aparente
A	[m ²]	Area
$\dot{E}$	[J/s]	Energía almacenada (Pérdida)
P_a	[N/ m ²]	Resistencia a la tracción
HB	[-]	Dureza Brinell
Carácteres especiales		
Γ	[-]	Coefficiente de distribución de peso por eje
Subíndice		
i		Inicial
f		Final
$Disc$		Disco rotor de freno
$Cond$		Conducción
$Conv$		Convección
Rad		Radiación
R		Real
A		Aparente
Max		Máxima

**Proceedings of the 7th International Conference on
Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics
(HEFAT2010)**

**19 – 21 July 2010
Antalya, Turkey**



THERMAL CHARACTERIZATION OF A GRAY CAST IRON VENTED BRAKE ROTOR DURING SEVERE-BRAKING USING INFRARED THERMOGRAPHY

Gutiérrez, G. J.^{a,b}, Garrido, O.^a
Jiménez, R.^a, Mena, E.^a

^a Author for correspondence

^b SEPI-ESIME-UA, Instituto Politécnico Nacional
Av. de las Granjas 682, Col. Sta. Catarina,
México C.P. 02250, México
E-mail: ggutierrezp@ipn.mx

ABSTRACT

High resolution infrared thermography was used to analyze the thermal response of a vented brake disk (made of gray cast iron) during sudden braking. This research was conducted to test brake rotors made of a new gray iron alloy. Experience with current rotors has shown the formation of cracks due to thermal stresses developed during braking episodes. Such crack results in the shortening of the service life of the brake rotor but also and most importantly they may constitute a safety risk to the people using a vehicle with damaged brake rotors. Results from the thermal characterization reveal that our approach to minimize cracking during braking episodes is the correct one.

INTRODUCTION

A gray cast iron vented brake rotor is exposed to strong frictional stresses during severe braking episodes. Due to it, maximum temperatures near 700 °C can be attained during a sudden braking in a few seconds [1,2]. Complex temperature distributions developed under these conditions cause strong thermal stresses and phase transformations which produce damage in the rotor as cracking and thermal strains. From previous studies it is well known that vented and the optimal material design helps to reduce the thermal cracking damage. In this study the composition of the gray cast irons was specifically designed in order to test them mechanically and thermally. The dynamical interaction between the brake and pad was analyzed by using infrared thermography of high resolution. These studies validate our design of the materials through the determination of heat flows and temperature distributions in the track braking under severe conditions. Brake systems in the automotive industry are one of the most important areas of concern for car manufacturers due to the safety issues inherent to them.

Brake systems are constituted by several mechanical components, among them a brake rotor which is attached to the tires and a caliper which holds the pads whose function is to apply pressure to the brake rotor to stop a moving vehicle. The pressure is applied through a hydraulic system controlled by a master cylinder, which in turn is operated from the drivers' seat. These components are located in each of the wheels of a vehicle.

In terms of its operation, brake systems must extract all the kinetic energy of a vehicle in motion, to do so friction between the pad and the brake rotor is responsible for stopping or decelerating the vehicle.

The kinetic energy transferred from a moving vehicle to the brake rotor can be estimated by means of the following relationship (1):

$$E = \frac{K}{2} \cdot \gamma \cdot \frac{m(v_0 - v_f)^2}{2} \quad (1)$$

Where K is the fraction of kinetic energy absorbed by the brake rotor (roughly 90 %), γ is the weight distribution coefficient per axis ($0 < \gamma < 1$), m is the mass of the vehicle (kg), v_0 and v_f are the initial velocity of the vehicle and that during braking respectively (m/s).

As mentioned, all the kinetic energy has to be transformed into heat; this heat is absorbed by the brake rotor since $K \sim 0.9E$ (1), the rest of the heat is dissipated by conduction, convection and radiation:

$$Q = Q_{brake} + Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{rad} \quad (2a)$$

The term Q_{brake} in equation (2a) may in turn be associated to the thermophysical properties of the material used in the manufacturing of the brake rotor, thus it yields:

$$Q = c_p \cdot m \cdot \Delta T_{brake} + Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{rad} \quad (2b)$$

The latter can be schematically described by means of Figure 1.

2 Topics

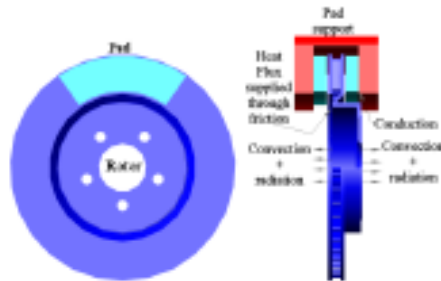


Figure 1 Rotor brake and pad assembly and the mechanisms involved in transforming the kinetic energy of the moving vehicle into heat.

In view of these facts, we have approached this problem as follows:

RATIONALE OF OUR WORK

Provided that the amount of kinetic energy transformed into heat renders the service life of brake rotors, two action courses can be taken in order to solve our problem:

- Change the design of the brake rotor (geometry)
- Modify the material used in manufacturing the rotors (Chemical composition change)

In a previous work [1], we have already shown that by doing small modifications to the chemical composition of the alloy used to manufacture the brake rotors, it is possible to enhance the mechanical properties of such components while keeping a good thermal response. Furthermore, we propose that by doing little changes in the chemical composition would result in better overall performance of the brake rotors which in turn will extend the service life of these components.

To prove the latter, we have conducted several tests on the rotors. The tests conducted include thermal measurements along with mechanical and non destructive inspection.

NOMENCLATURE

E	[J]	Kinetic energy transferred from a moving vehicle to the brake rotor
K	[-]	Fraction of kinetic energy absorbed by the brake rotor
m	[kg]	Mass of the vehicle, mass of the rotor
v	[m/s]	Velocity of the vehicle
Q	[J]	Heat
C_p	[J/kgK]	Specific heat
T	[°C]	Temperature
t	[s]	Time
R	[mm]	Ratio of the real area and the apparent contact area
A	[m ²]	Area
$\dot{E}$	[J/s]	Energy storage (loss)
σ	[N/m ²]	Tensile strength

HB [-] Brinell Hardness number

Special characters

γ [-] weight distribution coefficient per axis

Subscript

0	Initial
f	Final
$brake$	Brake rotor disk
$cond$	Conduction
$conv$	Convection
rad	Radiation
r	Real
a	Apparent
max	Maximum

EXPERIMENTAL

In order to verify the effect of the changes in chemical composition proposed, we conducted our research in several steps, namely:

- Alloy preparation
- Mechanical testing
- Non-destructive inspection
- Thermography

Alloy preparation:

The alloy was prepared by melting in an induction furnace with capacity of 40 kg, a mixture of carbon steel scrap and pig iron. Once melted, the alloy composition was fixed by adding different ferroalloys, inoculants and graphite. Carbon and sulphur contents in the alloy were analyzed by means of a LECO carbon analyzer. The remaining elements in the alloy were determined with an ICP apparatus.

Two alloys were prepared, one according to SAE J431/ASTM 159 standards, whereas the second alloy is the one we propose and it is out of specification. Chemical composition of both alloys is shown in Table 1.

Mechanical Testing

The tensile strength, the Brinell hardness number along with the metallographic features of both alloys were determined according to SAE J431/ASTM 159 standards. The values obtained for the tensile strength and the Brinell hardness number are shown in the results section. The metallographic features of the alloys are also shown in the next section.

Non-destructive inspection

Penetrating liquids inspection was conducted in rotor brakes made of the current alloy. This non-destructive evaluation was used to determine if any cracks or microcracks developed on the rotor surface after simulating a braking episode.

The penetrating liquids inspection revealed the amount, size and distribution of the different cracks developed on the test specimens

Interdisciplinary areas in heat, fluid flow and thermodynamics

Thermography

The rotor brakes were assembled in a probe (dynamometer) in such a way that both the rotor and the pad were completely exposed to an infrared camera. The rotor was allowed to rotate up 2000 RPM and suddenly a braking episode was simulated. Snapshots of the heating of the rotor surface were taken continuously at intervals of 0.2 s. The digital pictures obtained from an infrared camera allowed us to analyze the surface temperature distribution on the rotor and to estimate the overall heat fluxes involved during braking.

RESULTS AND DISCUSSION

Results from mechanical properties of the alloys are shown in Table 1. The data reported in Table 1 for the current alloy are in compliance with SAE J431/ASTM 159 standards, whereas the data obtained for the proposed alloy are out of such standards, however, this alloy exhibits better mechanical properties than those by the alloy used for the manufacturing of brake rotors. This indicates that the alloy suggested in this research is able to withstand higher stresses.

Alloy	Brinell Hardness number (HB)	Tensile strength (MPa)
Current	200	240
Proposed	248	300

Table 1 Results from the mechanical evaluation of the alloys tested.

Furthermore, the metallographic examination of both alloys show better phase distribution in the case of the proposed alloy than the other one. The graphite flakes in the proposed alloy (Figure 2B), are randomly distributed throughout the alloy pearlitic matrix and they also show uniform size; whereas in case of the current alloy used (Figure 2A), it is evident an irregular shape and size of the graphite flakes, in addition to a less random accommodation of them.

Such metallographic features exhibited by the proposed alloy along with the mechanical properties evaluated on them allow us to assure a better performance of this alloy under stricter mechanical conditions, in other words, the microstructure of this new alloy ensures better mechanical properties thus an increased capacity to withstand higher stresses.

In terms of the non-destructive testing, it was only performed in an actual damaged brake rotor. Figure 3, shows a picture of the inspection once the penetrating liquids were revealed. It can be seen in the right side image in Figure 3 the development of several microcracks along the surface of the brake rotor.

On the other hand, Figure 4 shows how a crack penetrates into the brake rotor, it was determined that cracks develop inwards the component up to 2.5 cm in deep. Such crack size is

detrimental to the integrity of this type of critical components, more so, such defects may induce catastrophic failure at any given time.

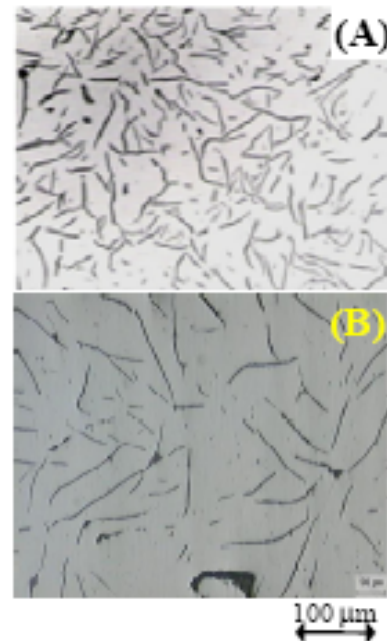


Figure 2 (A) Micrograph of the alloy currently used in the manufacture of brake rotors, (B) Micrograph of the proposed alloy

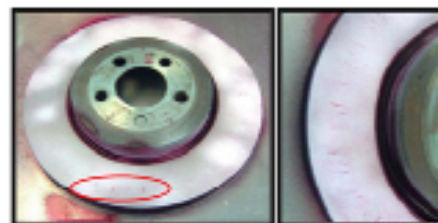


Figure 3 Results from the non-destructive testing on a brake rotor removed from service

These cracks are the result of the thermo-mechanical interaction between the rotor and the pad. Since the pad is normally made of an abrasive material, it is expected that due to the friction between these components some localized stresses develop along the contact surface. In addition to the mechanical interaction, the friction among the pad and the rotor also generates heat so the rotor heats as the braking system operates. The heating of the rotor is more evident in the case of emergency braking.

The rotor brakes were assembled in a probe bank (dynamometer) in such a way that both the rotor and the pad were completely exposed to the sensing of a high resolution infrared camera. The rotor was allowed to spin up 2000 RPM

2 Topics

and suddenly braking episodes were imposed. Figure 5 shows the plot of the average surface temperature as a function of time for a succession of braking episodes.

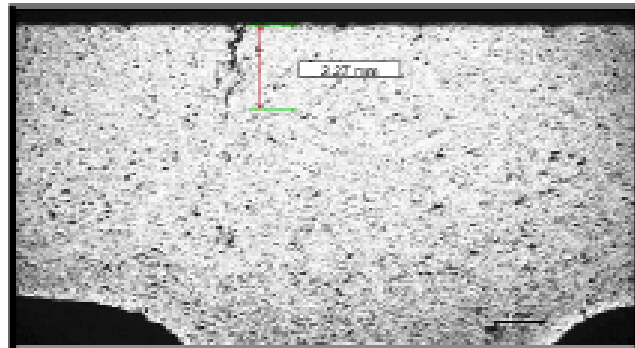


Figure 4 Transversal cut of a rotor brake showing the penetration of a crack developed onto the rotor's surface

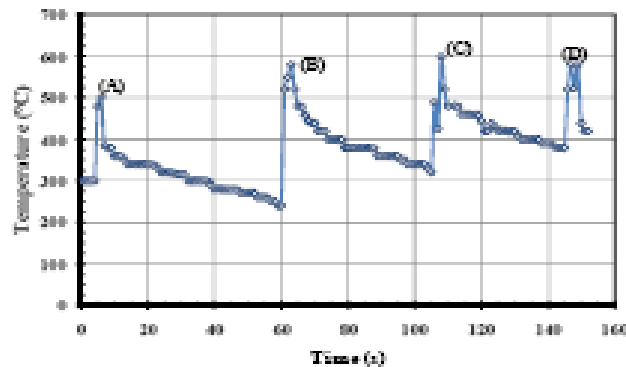


Figure 5 Evolution of average temperatures for a series of braking episodes (peaks). Temperature values were obtained from the infrared images

Figure 6 shows four snapshots of the maxima temperatures indicated in plot of Figure 5. Notice that in the episode (D) their thermography shows a very uniform heating. Infrared thermographies were obtained with a digital infrared camera model FLIR-T710 that detects temperature differences as small as 0.08 °C.

By the way, representative infrared pictures of the heating of the rotor during braking, are shown in Figure 7. Such pictures correspond to the episode (A). In this case, the thermal pictures were taken each 1/15 s. In the snapshots of Figure 7 three important temperature stages of braking are given: (a) before, (b) during and (c) after the sudden braking. The pictures also have a spatial high resolution that yields values each 1 mm along any direction. This detail degree allowed us to obtain accurate spatial temperature distributions on the rotor surface and to estimate, by employing analysis of digital images, important phenomena occurring during braking: for instance, in Figure 7(b) it can be noted that during braking, in the instant of maximum temperature, there are three hot rings that indicate a non uniform frictional contact and consequently

a diminution of the effective contact area of the pad with the rotor.

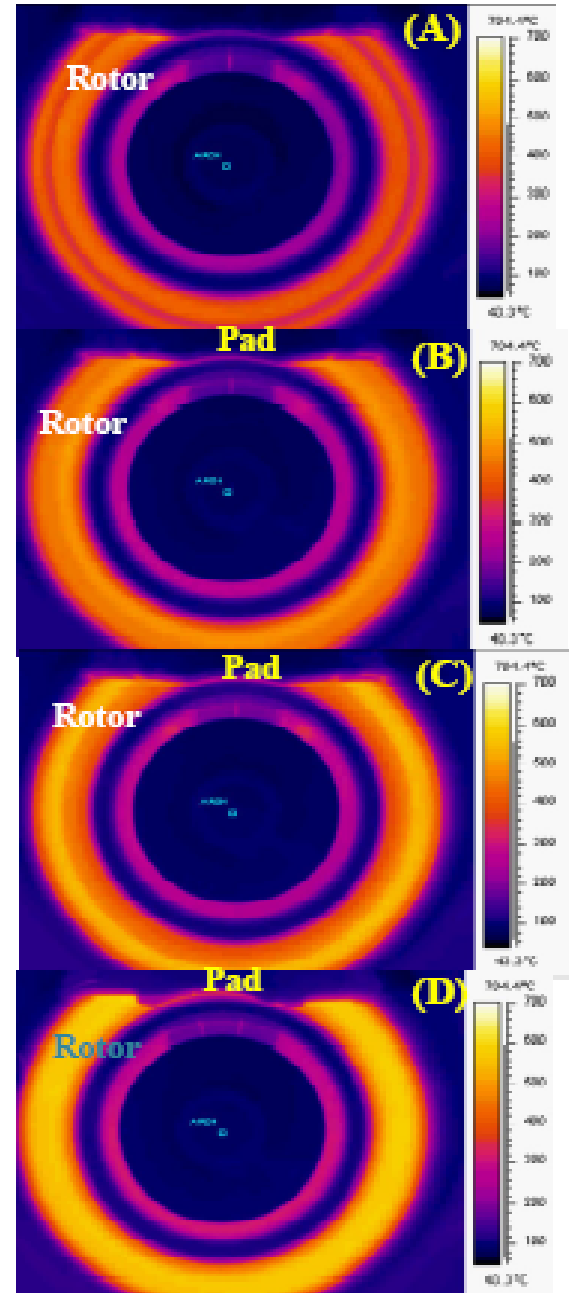


Figure 6 Infrared thermographies of the maxima temperature distributions during braking, corresponding to points (A)-(D) of the plot in Figure 5. Notice that the most uniform temperature is attained in the last braking episode (D)

Interdisciplinary areas in heat, fluid flow and thermodynamics

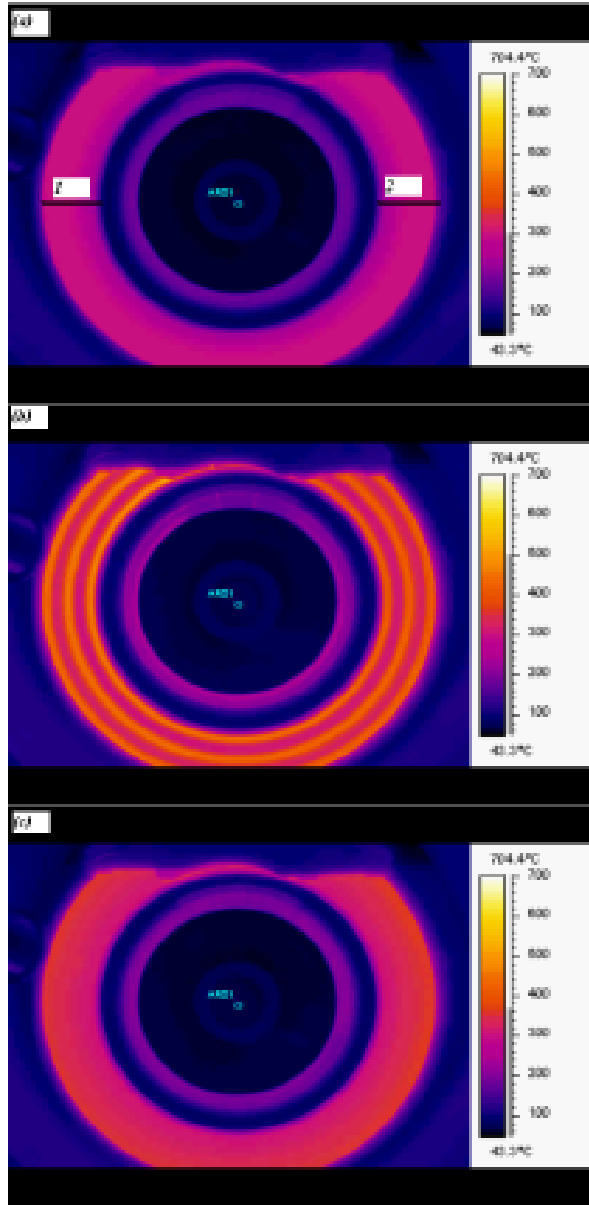


Figure 7 Thermal snapshots of the braking: (a) thermography previous to the braking, (b) thermography that evidences three radial heat spots and (c) uniform temperature distribution when the rotor goes to a constant angular velocity

A quantitative estimation of the values of temperatures in those rings is given in Figure 8 where the sizes of the rings can be estimated as 10 mm each one. Measurements of the sizes of these structures can be useful to estimate in a realistic way the ratio of the real area and the apparent contact area, $R = A_r/A_a$ [3]. In this case it has been estimated that $R=0.50$.

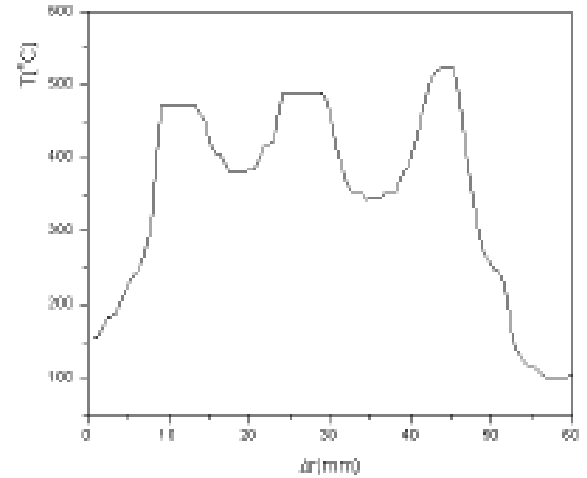


Figure 8 Temperature profile along the line 1 (indicated in Fig. 7(a)) in the instant of maximum surface temperature on the brake rotor (Fig. 7(b)). Notice the strong temperature increase respect to the temperature in between rings

Based on recent theoretical studies [2], it is possible to establish that, in this episode, this value of R yields the maximum temperature, T_{max} , because occurs a temperature increasing with a decreasing in the contact area ratio. This result could be useful to improve the design the compositions and the performance of the rotor and pads.

Moreover, when the temperature of the solid is spatially uniform it is possible to estimate the energy storage (loss) in the rotor during each braking episode, it is given as [3]:

$$\dot{E} = mc \frac{dT}{dt}, \quad (3)$$

where m is the mass of the rotor and c is the specific heat. Thus, the time derivative of T is proportional to such an energy. In Figure 9(a) it is shown the profile of the maximum surface temperature during a braking episode and their plot of dT/dt as a function of time is given in Figure 9(b). From plot in Figure 9(b) it is clear that during braking the rotor gains energy (positive values of dT/dt) in a smooth way due to the frictional contact but the rotor loss thermal energy in a discontinuous way, mainly through conduction and radiation mechanisms and after through convection because at high velocities this is the main mechanism of heat loss [3-7].

Also, infrared thermography correctly reveals that at high velocities (before and after a braking episode) the temperature is slightly higher on the right hand side than on the left hand side. See Figure 10. It means that in a half revolution the rotor lost heat, by a convective mechanism, by around 10 °C. It can be concluded that in this latter case fins helps to cool efficiently the rotor.

2 Topics

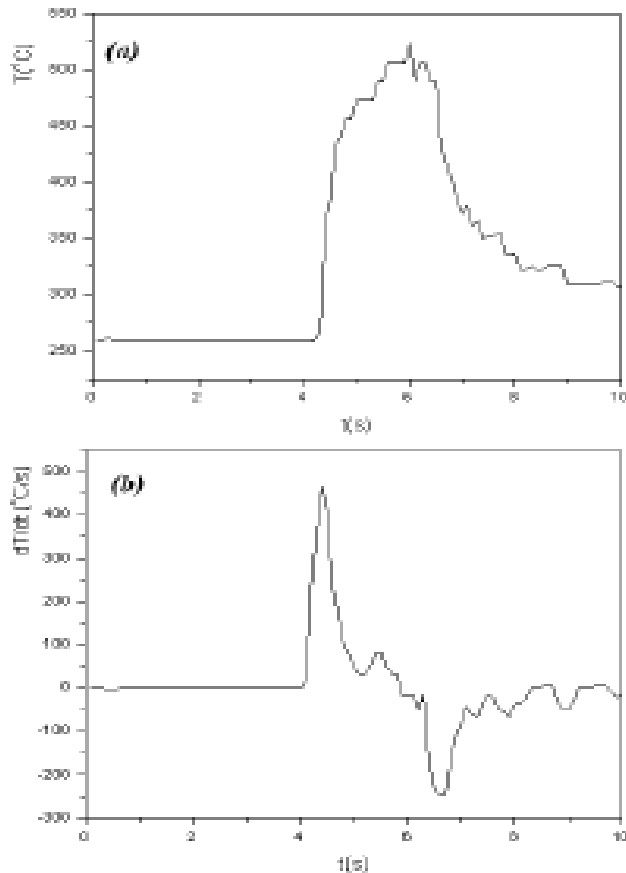


Figure 9 (a) Punctual change of the maximum temperature as a function of time during a braking episode. (b) Temporal derivative dT/dt for the profile given in (a). This quantity is proportional to the energy

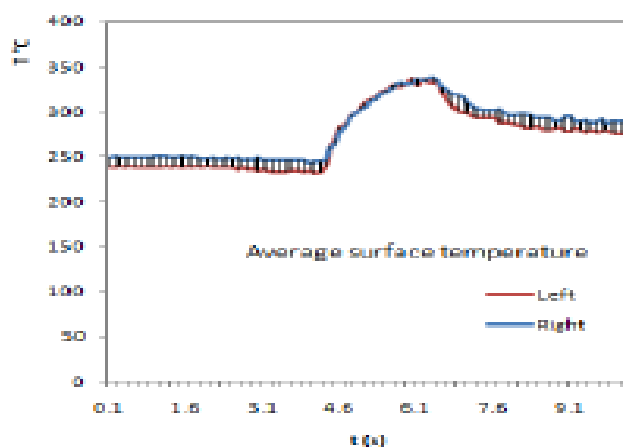


Figure 10 Time averaged surface temperatures on the left hand side (red) and

CONCLUSIONS

In this paper, we have shown that infrared thermography is a very useful tool to determine accurate spatial and temporal temperature profiles. These profiles allows us to obtain valuable information as the maxima temperatures in each braking episode, the existence of hot rings, the gain and lost of heat and the importance of these events upon the compositional and mechanical properties. The overall results given here can used to improve the performance and to design of vented brake rotors.

ACKNOWLEDGEMENTS

Authors would like to give acknowledgements to COFAA-IPN for the financial support thought the project SIP 20090783. G.G.J also wish to thank the help of her colleagues Profs. Fausto Sánchez and Abraham Medina.

REFERENCES

- [1] Mesa, E. Bachelor thesis, ESIME UA IPN Mexico, 2010.
- [2] Thervenet, J., Simon, M., Demset, B., Brake disc surface temperature measurement using a fiber optic two-color pyrometer, *Proceedings of the 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, Krakow - Poland July 2-5, 2008.
- [3] Qi, H.S., Day, A.J., Investigation of disc/pad interface temperatures in friction braking, *Wear*, Vol. 262, 2007, pp. 505-513
- [4] A.D. McPhee, D.A. Johnson, Experimental heat transfer and flow analysis of a vented brake rotor, *International Journal of Thermal Sciences* 47 (2008) 458-467
- [5] Ji-Hoon Choi, In Lee., Finite element analysis of transient thermoelastic behaviors in disk brakes, *Elsevier Wear*, Vol.257, 2004, pp. 47-58
- [6] F. Talati and S. Jalalifar., Investigation of Heat Transfer Phenomena on a Ventilated Disk Brake Rotor with Straight Radial Rounded Vanes, *J. Applied Sci.*, Vol. 8, 2008, pp 3583 - 3592
- [7] Zhongshu Chi, Greg F. Naterer and Yuping He., Effects of Brake Disk Geometrical Parameters and Configurations on Automotive Braking Thermal Performance, *Transactions of the CSME / de la SCSM*, Vol. 32, 2008, pp 313- 324.