

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
	FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	F-AC-DBL-007	10-04-2012	A
Dependencia	Aprobado		Pág.	
DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	SUBDIRECTOR ACADEMICO		1(149)	

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTOR	Ricardo Andrés García León		
FACULTAD	Ingenierías		
PLAN DE ESTUDIOS	Ingeniería Mecánica		
DIRECTOR	María Angélica Acosta Pérez		
TÍTULO DE LA TESIS	EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS FRENOS DE DISCO DE LOS VEHÍCULOS A PARTIR DEL ANÁLISIS DE LA ACELERACIÓN DEL PROCESO DE CORROSIÓN.		
RESUMEN			
(70 palabras aproximadamente)			
<p>El sistema de frenado de un automóvil debe satisfacer un complejo conjunto de requerimientos, entre los cuales, la seguridad es el más importante. Los frenos deben trabajar en forma segura y predecible bajo cualquier circunstancia, lo cual implica disponer de un nivel estable de fricción, bajo cualquier condición de temperatura y factores ambientales.</p> <p>Para un correcto diseño y operación de los discos de freno, es necesario considerar diferentes aspectos (geometría, material, resistencia mecánica, temperatura máxima, deformación térmica, resistencia al agrietamiento, etc.). Todos estos aspectos inciden a que el proceso de corrosión se vea acelerado.</p>			
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 149	PLANOS: 6	ILUSTRACIONES: 51	CD-ROM: 1



**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS FRENOS DE DISCO DE LOS
VEHÍCULOS A PARTIR DEL ANÁLISIS DE LA ACELERACIÓN DEL PROCESO
DE CORROSIÓN**

RICARDO ANDRÉS GARCÍA LEÓN

**UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA MECÁNICA
OCAÑA
2014**

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS FRENOS DE DISCO DE LOS
VEHÍCULOS A PARTIR DEL ANÁLISIS DE LA ACELERACIÓN DEL PROCESO
DE CORROSIÓN**

RICARDO ANDRÉS GARCÍA LEÓN

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

**Director
MARÍA ANGÉLICA ACOSTA PÉREZ
PhD. Ingeniería Mecánica**

**UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA MECÁNICA
OCAÑA
2014**

A los engranes fundamentales de mi vida,

Laury León, Ricardo García y Laura García León.

Por su amor y apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios por haberme colocado en el escenario perfecto y culminar esta etapa tan importante de mi vida.

A mi abuela Cena Trigos, por su gran amor y entrega durante mi formación.

A mis familiares Negie León, Nayibe León, Ludfy León, Angel Lemos, Morela García, Diana León y Katherine León, por su cariño y apoyo.

A mis amigos Raúl Echeverri, Nairo Cardona, Carlos Clavijo y Eduar Pérez, por su amistad a lo largo de todos estos años de esfuerzo.

A R. Castilla Betancourt, por sus palabras y cariño especial.

A la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, por darme la oportunidad de ser parte de ella y adquirir los conocimientos durante este periodo de formación académica.

A los profesores María Angélica Acosta, Eder Flores y Mary Bohórquez, por sus consejos, enseñanza, apoyo y más que todo por su amistad durante mi formación como profesional.

A todos las demás personas que fueron participes de este proyecto Muchas Gracias.

CONTENIDO

	Pág.
<u>INTRODUCCIÓN</u>	18
1. <u>TÍTULO</u>	19
1.1 <u>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</u>	19
1.2 <u>FORMULACIÓN DEL PROBLEMA</u>	19
1.3 <u>DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA</u>	19
1.4 <u>OBJETIVOS</u>	20
1.4.1 General	20
1.4.2 Específicos	20
1.5 <u>JUSTIFICACIÓN</u>	20
2. <u>MARCO DE REFERENCIA</u>	21
2.1 <u>MARCO HISTORICO</u>	21
2.1.1 Revisión del estado del arte	21
2.2 <u>MARCO CONCEPTUAL</u>	29
2.2.1 Sistema de frenos en el Automóvil	29
2.2.2 Problemas principales asociados a los discos de freno	35
2.2.3 Corrosión	40
2.2.4 Metalurgia de los hierros.	45
2.2.5 Teorías matemáticas	48
2.3 <u>MARCO LEGAL</u>	49
3. <u>DISEÑO METODOLOGICO</u>	51
3.1 <u>TIPO DE INVESTIGACIÓN</u>	51
3.2 <u>POBLACION</u>	51
3.3 <u>MUESTRA</u>	51
3.4 <u>TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN</u>	52
3.5 <u>INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN</u>	52
3.6 <u>FASES DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN</u>	52
3.6.1 FASE I. Indagación del tema	52
3.6.2 FASE II. Moldeamiento de la propuesta	52
3.6.3 FASE III. Presentación de la propuesta	52
3.6.4 FASE IV. Socialización de la propuesta	52
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	53
4.1 <u>IDENTIFICACIÓN DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LA FABRICACIÓN DE LOS FRENOS DE DISCO CON EL FIN DE DETERMINAR SUS PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS.</u>	53
4.1.1 Composición química de la fundición gris	53
4.1.2 Propiedades mecánicas de la fundición gris	54

4.2	<u>EVALUACIÓN DE LOS DIFERENTES ENSAYOS DE LABORATORIO REALIZADOS, MEDIANTE LA COMPARACIÓN NUMÉRICA DE LOS DATOS OBTENIDOS, A TRAVÉS DEL ANÁLISIS MATEMÁTICO Y SISTEMÁTICO.</u>	56
4.2.1	Análisis dinámico del sistema de frenos	57
4.2.2	Análisis de Transferencia de calor en el sistema de frenos	66
4.3	<u>ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES METALGRÁFICAS, MECÁNICAS, ESTRUCTURALES Y TÉRMICAS DE LOS FRENOS DE DISCO, A TRAVÉS DE ENSAYOS DE LABORATORIO Y CON LA AYUDA DE LOS SOFTWARE ANSYS Y SOLIDWORKS.</u>	101
4.3.1	Características de dureza	101
4.3.2	Análisis metalográfico	104
4.3.3	Características estructurales	112
4.3.4	Análisis estructural estático	118
4.3.5	Análisis térmico	121
5.	<u>CONCLUSIONES</u>	124
6.	<u>RECOMENDACIONES</u>	125
	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	126
	<u>REFERENCIAS DOCUMENTALES ELECTRÓNICAS</u>	127
	<u>ANEXOS</u>	129

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ejemplo de la situación de contacto entre la pastilla y el disco.....	21
Figura 2. Componentes de un sistema de freno.	30
Figura 3. Estructura de un disco de freno ventilado.....	30
Figura 4. Tipos de frenos de los vehículos.....	34
Figura 5. Falla de disco por montaje incorrecto de la pinza.	35
Figura 6. Falla por holgura en los rodamientos.....	36
Figura 7. Falla de disco por temperatura excesiva.....	36
Figura 8. Falla por desgaste excesivo del disco.	37
Figura 9. Falla por agrietamiento.	37
Figura 10. Falla por desgaste excesivo de las pastillas.	38
Figura 11. Falla por cristalización de las pastillas.	38
Figura 12. Falla de disco por ralladuras y surcos.....	39
Figura 13. Falla por depósitos de material en los discos.....	39
Figura 14. Manchas por Cold y Hot Judder en los discos.....	40
Figura 15. Algunos tipos de corrosión comunes.....	41
Figura 16. Clasificación de la corrosión.	43
Figura 17. Factores que influyen en la corrosión.....	44
Figura 18. Clasificación de los aceros.....	46
Figura 19. Aspecto de la fractura del disco.....	53
Figura 20. Relación aproximada entre la resistencia y módulo de elasticidad de la fundición gris.....	55
Figura 21. Vibraciones producidas por diferentes fundiciones.....	56
Figura 22. Diámetros interior y exterior del disco 1.	72
Figura 23. Diámetros interior y exterior del disco 2.	73
Figura 24. Diámetros interior y exterior del disco 3.	73
Figura 25. Flujo al rededor del cilindro.	77
Figura 26. Convección periférica del disco de freno.	77
Figura 27. Espesores del disco de freno 1. (mm).....	80
Figura 28. Espesores del disco de freno 2. (mm).....	80
Figura 29. Espesores del disco de freno 3. (mm).....	80
Figura 30. Convección en la campana del disco de freno.....	81
Figura 31. Convección lateral en un disco de freno.....	83
Figura 32. Conductos de ventilación del disco de freno.	90
Figura 33. Dimensiones del ducto de ventilación del disco de freno 1.....	91
Figura 34. Dimensiones del ducto de ventilación del disco de freno 2.....	92

Figura 35. Dimensiones del ducto de ventilación del disco de freno 3.....	92
Figura 36. Triángulo de velocidades a la entrada del aire.....	93
Figura 37. Triángulo de velocidades a la salida del aire.	94
Figura 38. Durómetro digital marca Mitutoyo.	101
Figura 39. Cargas para los diferentes tipos de dureza Rockwell.	102
Figura 40. Muestras de los 3 discos.	102
Figura 41. Dureza Brinell para diferentes fundiciones.	104
Figura 42. Extracción de la probeta para el análisis metalográfico.	105
Figura 43. Cortadora Pico155.	105
Figura 44. Montaje de presión TP-7001.	106
Figura 45. Pulidor automatizado Nano 2000T.....	106
Figura 46. Muestras atacadas con Nital al 2%.	108
Figura 47. Microscopio óptico de marca Optiks.....	108
Figura 48. Diagrama Hierro carbono.	112
Figura 49. Prensa Universal modelo 50 K marca Pinzuar Ltda.	113
Figura 50. Extracción de las probetas de compresión.....	114
Figura 51. Valores de prueba de test fading.....	121

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Componentes de un freno.	33
Tabla 2. Propiedades Físico-Mecánicas de los discos de freno.	34
Tabla 3. Grado de hierros grises automotrices para propósitos de diseño por SAE J431....	45
Tabla 4. Rangos de dureza para diferentes hierros grises.	46
Tabla 5. Distribución gráfica.	47
Tabla 6. Características de los discos.....	56
Tabla 7. Valores aproximados del coeficiente de resistencia a la rodadura de los neumáticos.....	58
Tabla 8. Coeficientes de adherencia (μ) de neumáticos sobre calzadas en diferente estado, con distintos estados de los neumáticos y a diferentes velocidades.....	59
Tabla 9. Tiempo de frenado en función de la velocidad y el ángulo de descenso para el vehículo.	61
Tabla 10. Variación de la deceleración de un vehículo dependiente del ángulo de descenso para el vehículo.	62
Tabla 11. Distancias de frenado a distintas velocidades y ángulos de descenso para el vehículo.	63
Tabla 12. Distancias de frenado a distintas velocidades hasta la detención del vehículo y ángulos de descenso para el vehículo.	65
Tabla 13. Variación de la potencia en función de la velocidad y el ángulo de descenso para el vehículo.	70
Tabla 14. Diámetros y áreas de los discos.	73
Tabla 15. Variación de la temperatura en función del tiempo del enfriamiento de Newton para los discos.	74
Tabla 16. Propiedades del aire a diferentes temperaturas.	78
Tabla 17. Geometría del neumático de los vehículos.	87
Tabla 18. Anchos y velocidades a la entrada del ducto.	93
Tabla 19. Geometrías y áreas de la sección transversal de los ductos.	98
Tabla 20. Diámetros y áreas de los ductos.....	100
Tabla 21. Dureza Rockwell para los tres discos.	103
Tabla 22. Valores de dureza Rockwell y Brinell.	103
Tabla 23. Proceso de pulido.	107
Tabla 24. Resultados obtenidos en el microscopio.	109
Tabla 25. Características metalográficas de la Fundición gris.....	110
Tabla 26. Dimensiones de la probeta al inicio del ensayo.	114
Tabla 27. Ensayo de compresión.	115

Tabla 28. Dimensiones de la probeta después del ensayo.	116
Tabla 29. Simulación del ensayo de compresión mediante el Software SolidWorks.	117
Tabla 30. Geometría de los discos.	118
Tabla 31. Deformaciones totales en los discos.	119
Tabla 32. Tensiones de Von Mises para los discos.....	119
Tabla 33. Deformaciones elásticas en los discos.	120
Tabla 34. Factor de seguridad en los discos.....	120
Tabla 35. Distribución de temperaturas en los discos.....	122
Tabla 36. Flujo de calor total en los discos.	123
Tabla 37. Dirección del flujo de calor en los discos.	123

LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Grafica 1. Composición química del disco de freno.	32
Grafica 2. Composición de la pastilla de freno.	32
Grafica 3. Gráfica del enfriamiento de Newton para el disco de freno 1.....	75
Grafica 4. Gráfica del enfriamiento de Newton para el disco de freno 2.....	75
Grafica 5. Gráfica del enfriamiento de Newton para el disco de freno 3.....	76

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Resistencia a la rodadura.....	58
Cuadro 2. Coeficiente de resistencia a la rodadura.....	59
Cuadro 3. Fuerza en el pedal.....	60
Cuadro 4. Energía disipada por el sistema de frenos.....	67
Cuadro 5. Energía en el eje delantero.....	68
Cuadro 6. Energía en el disco.....	68
Cuadro 7. Energía total en el disco.....	68
Cuadro 8. Energía en la pastilla.....	69
Cuadro 9. Diferencia de temperatura entre el disco y el medio ambiente.....	71
Cuadro 10. Temperatura en la superficie del disco.....	72
Cuadro 11. Temperatura periférica en los discos.....	78
Cuadro 12. Número de Reynolds para convección periférica.....	78
Cuadro 13. Número de Nusselt para convección periférica.....	79
Cuadro 14. Coeficiente de convección periférica.....	79
Cuadro 15. Área superficial de la periferia del disco de freno.....	80
Cuadro 16. Velocidad de pérdida de calor periférica.....	81
Cuadro 17. Número de Reynolds para convección en la campana.....	81
Cuadro 18. Número de Nusselt para convección en la campana.....	82
Cuadro 19. Coeficiente de convección en la campana.....	82
Cuadro 20. Área superficial del disco en la campana.....	82
Cuadro 21. Velocidad de pérdida de calor en la campana.....	83
Cuadro 22. Velocidad de pérdida de calor frontal en el disco.....	83
Cuadro 23. Viscosidad cinemática de Denver.....	85
Cuadro 24. Número de Reynolds para placas planas.....	85
Cuadro 25. Número de Nusselt para placas planas.....	85
Cuadro 26. Coeficiente de convección para placas planas.....	85
Cuadro 27. Velocidad de pérdida de calor por convección lateral.....	86
Cuadro 28. Características de la llanta.....	87
Cuadro 29. Radios y diámetros de los discos.....	87
Cuadro 30. Perímetro de la rueda.....	88
Cuadro 31. Revoluciones por segundo del disco.....	88
Cuadro 32. Revoluciones por minuto del disco.....	88
Cuadro 33. Velocidad angular del disco.....	89
Cuadro 34. Número de Reynolds por efecto giratorio.....	89
Cuadro 35. Número de Nusselt por efecto giratorio.....	89

Cuadro 36. Coeficiente de convección por efecto giratorio.....	90
Cuadro 37. Velocidad de pérdida de calor por efecto giratorio.	90
Cuadro 38. Ángulo beta a la entrada del ducto.	93
Cuadro 39. Velocidad relativa a la entrada del fluido con respecto al ducto.....	94
Cuadro 40. Caudal del fluido por los ductos.....	94
Cuadro 41. Velocidad absoluta del fluido a la salida.....	95
Cuadro 42. Velocidad absoluta a la salida del ducto.	95
Cuadro 43. Ángulo beta a la salida del ducto.....	95
Cuadro 44. Velocidad relativa a la salida del fluido con respecto al ducto.	96
Cuadro 45. Velocidad periférica absoluta a la salida del ductos.....	96
Cuadro 46. Velocidad absoluta del fluido a la salida del ductos.	96
Cuadro 47. Ángulo alfa a la salida del ductos.....	97
Cuadro 48. Velocidad media del fluido.	97
Cuadro 49. Número de Reynolds por convección entre los ductos.	99
Cuadro 50. Valores de a y b para el número de Nusselt.	99
Cuadro 51. Número de Nusselt por convección entre los ductos.	99
Cuadro 52. Coeficiente de convección por los ductos.	99
Cuadro 53. Pérdida de calor total en los ductos de ventilación.	100

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Propiedades de metales sólidos.	130
ANEXO B. Propiedades del aire a la presión de 1 atmosfera.	131
ANEXO C. Número de Nusselt promedio para convección.	132
ANEXO D. Número de Nusselt y factor de fricción para el flujo laminar.	133
ANEXO E. Norma ASTM 370.	134
ANEXO F. Norma ASTM E9.	134
ANEXO G. Norma ASTM A247.	135
ANEXO H. Norma ASTM E18.	136
ANEXO I. Continuación de la Norma ASTM E18.	137
ANEXO J. Resultados de la maquina universal para el Disco 1.	138
ANEXO K. Resultados de la maquina universal para el Disco 2.	139
ANEXO L. Resultados de la maquina universal para el Disco 3.	140
ANEXO M. Resultados de la maquina universal para la Disco Porción 1.	141
ANEXO N. Resultados de la maquina universal para la Disco Porción 2.	142
ANEXO O. Resultados de la maquina universal para la Disco Porción 3.	143
ANEXO P. Geometría del disco 1.	144
ANEXO Q. Planos del disco 1.	145
ANEXO R. Geometría del disco 2.	146
ANEXO S. Planos del disco 2.	147
ANEXO T. Geometría del disco 3.	148
ANEXO U. Planos del disco 3.	149

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de frenado se fundamentan en la fricción para llevar el vehículo a una detención del movimiento, basándose en que la presión hidráulica empuja las pastillas de freno contra un disco de hierro fundido. En consecuencia de esto, en este tipo de frenos se crea un calor considerable durante el frenado, aumentando la temperatura por fricción en los frenos de disco, este calor es disipado rápidamente a través del aire circundante, por medio del fenómeno de convección y conjuntamente acelerando el proceso de corrosión. Cuando la temperatura alcanza valores elevados, el fenómeno de la radiación también ayuda a disipar la energía almacenada en el disco.

Con la disponibilidad actual de herramientas de cálculo asistido por computador (software de cálculos mecánicos y térmicos), la simulación numérica es el método más adecuado y conveniente para analizar el comportamiento de los discos de freno, durante su funcionamiento, bajo distintas condiciones de trabajo.

Sin embargo, cualquier nuevo diseño empleando herramientas de cálculo asistido por computador, debe ser validado. Con ensayos de laboratorios en la maquina universal y morfología del material. Ambos modos de estudio simulación y experimentación, deben estar incorporados en cualquier metodología de diseño de discos de freno, si se desea que ésta, sea realmente válida.

1. TITULO

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS FRENOS DE DISCO DE LOS VEHÍCULOS A PARTIR DE ANÁLISIS DE LA ACELERACIÓN DEL PROCESO DE CORROSIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Insuficiencia de información sobre la dimensión del efecto producido por la aceleración del proceso de corrosión en los frenos de disco de los vehículos y la influencia en las propiedades Físico-Mecánicas del material.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cuáles de las propiedades Físico-Mecánicas del material se ven influenciadas por la incidencia de la aceleración del proceso de corrosión en los frenos de disco de los vehículos?

1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los sistemas de frenado se fundamentan en la fricción para llevar el vehículo a una detención del movimiento, basándose en que la presión hidráulica empuja las pastillas de freno contra el disco de hierro fundido. En consecuencia de esto, en este tipo de frenos se crea un calor considerable durante el frenado, aumentando la temperatura por fricción en los frenos de disco, este calor es disipado rápidamente al aire circundante, por medio del fenómeno de convección y conjuntamente acelerando el proceso de corrosión.

Los frenos de disco están compuestos de hierro fundido que es un material que puede corroerse fácilmente, como la mayor parte de la fuerza de frenado realizada por los frenos delanteros, el óxido de superficie se limpia rápidamente gracias a la fuerza de acción de las pastillas en los discos, pero el fenómeno de la temperatura afecta la propiedad microestructural de los frenos creando agrietamientos en donde se empieza a corroer el material principalmente en esa parte en donde las pastillas de freno no alcanzan a limpiar la superficie.

De esta manera, se crea la necesidad de que el proceso de frenado funcione óptimamente y confiablemente, se ha visto la necesidad de evaluar el comportamiento de la aceleración de la corrosión en los frenos de disco de los vehículos para generar alternativas que hagan que estos no se vean afectados por los factores que en este proceso se vea acelerado y afecte las propiedades Físico-Mecánicas del material.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 General. Evaluar el comportamiento de los frenos de disco de los vehículos mediante el análisis de la aceleración del proceso de corrosión.

1.4.2 Específicos. Identificar los materiales utilizados en la fabricación de los frenos de los disco con el fin de determinar sus propiedades y características.

Evaluar los diferentes ensayos de laboratorio realizados, mediante la comparación numérica de los datos obtenidos, a través del análisis matemático y sistemático.

Analizar las propiedades metalográficas, mecánicas, estructurales y térmicas de los frenos de disco, a través de ensayos de laboratorio y con la ayuda de los software Ansys y SolidWorks.

1.5 JUSTIFICACIÓN

Es de interés del autor del proyecto de investigación continuar el mismo incluyendo conjuntamente las variables: fricción, temperatura y propiedades Físico-Mecánicas que han sido abordadas en otros estudios de forma independiente y así mismo analizar la incidencia de la aceleración del proceso de corrosión en los frenos de disco de los vehículos.

A nivel industrial este proyecto ayudara a determinar los puntos críticos por los cuales están sometidos los frenos de disco ayudando de esta manera al mejoramiento de la vida útil, garantizando mayor productividad y efectividad en el proceso, de igual forma beneficiara a los dueños de los vehículos con una mejora en la calidad del freno de disco en donde se minimizaran los costos de mantenimiento, la seguridad y la funcionalidad operacional. Estos aspectos serán de gran interés a nivel investigativo ya que mediante el análisis numérico de los componentes se pueden determinar en tiempo real aquellos fenómenos que ocurren en este tipo de dispositivos.

Con la realización de este proyecto de investigación se analizaran y estudiaran los efectos por los cuales se ve acelerado el proceso de corrosión en los frenos de disco de los vehículos, ya que existen factores críticos que afectan la microestructura del material variando sus propiedades Físico-Mecánicas.

2. MARCO DE REFERENCIA

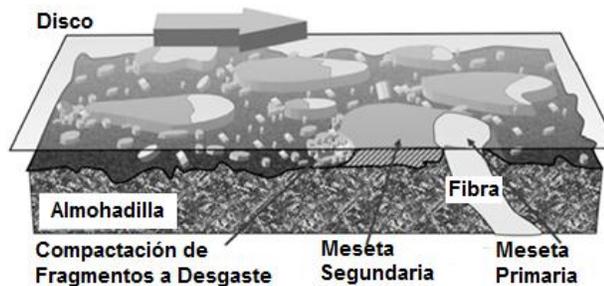
2.1 MARCO HISTORICO

2.1.1 Revisión del estado del arte. En la actualidad existen proyectos en los cuales se ha investigado en la incidencia de los diferentes fenómenos que influyen sobre la aceleración del proceso de corrosión en los frenos de disco, generando alternativas y medios para prevenir su deterioro y en consecuencia no se vean afectadas las propiedades del material. A través de la investigación realizada para este proyecto, se logró observar que la mayoría de los trabajos realizados a los frenos de disco fue a nivel internacional y a nivel nacional no se ha trabajado con este tipo de dispositivos.

2.1.1.1 A nivel Internacional. Se realizaron investigaciones en los frenos de disco de los vehículos evaluando diferentes efectos que hacen que el proceso de corrosión se vea acelerado.

El desgaste y las partículas en el aire generado a partir de los frenos de disco se originan del contacto entre la pastilla y el disco. Eriksson presentó un modelo explicativo de la situación de contacto entre un complejo de pastillas de freno orgánica y un disco de hierro fundido, Osterle y Ostermeyer se presentan resultados similares. En este modelo, ver Figura 1, las fibras metálicas u otros materiales duros en la almohadilla del material forma mesetas primarias estables o parches, que llevan a la parte principal de la carga.¹

Figura 1. Ejemplo de la situación de contacto entre la pastilla y el disco.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Eriksson llegó a la conclusión de que la dureza de mesetas primaria y secundaria es aproximadamente la misma, y que la dureza del material de la matriz es de aproximadamente 20 veces menor. Es decir, las mesetas más difíciles de proteger en el material de la matriz a continuación se desgastan. El tamaño de las mesetas es

¹ WAHLSTROM, Jens. A study of airborne wear particles from automotive disc brakes. The Royal Institute of Technology. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 15 de Noviembre de 2013]. p.1400 – 1179.

aproximadamente entre 50 micras y 500 micras. Además, se ha demostrado que la superficie de la meseta está cubierta por un tercer cuerpo nano cristalino formado por las partículas de desgaste. Este tercer cuerpo está compuesto principalmente por óxidos de hierro. La parte principal de la energía de fricción se disipa en calor en las mesetas, y aumenta la temperatura de la pastilla y el disco, lo que conduce a la más alta temperatura de una meseta. Para resumir, la fricción y el desgaste en el comportamiento macroscópico de un freno de disco se pueden explicar por la situación de contacto microscópica crecimiento y la destrucción de mesetas de contacto en la capa límite entre la almohadilla y el disco.²

Las simulaciones numéricas de la fricción y el desgaste de comportamiento de los frenos de disco se han estudiado con diferentes enfoques, incluyendo el de autómatas celulares (MCA) y el análisis de elementos finitos (FEA). Se utiliza un modelo para calcular numéricamente el comportamiento de los cuerpos. Esta técnica se puede utilizar para comprender el flujo de partículas en una escala de longitud nanoscópica. Con el fin de simular numéricamente el comportamiento macroscópico de los frenos de disco, un método numérico que puede manejar la situación de contacto complejo con la longitud microscópica y el tiempo que se necesita en escalas. Como tal, Müller y Ostermayer utilizan un enfoque del autómata celular para describir la fricción en tres dimensiones y el desgaste de comportamiento de los frenos de disco.³

Un autómata celular se compone de una cuadrícula cuyos elementos son células, un conjunto finito de variables internas y las relaciones de vecindad dadas a cada celda, y un conjunto de reglas funciones de transición que determinan el nuevo estado en el tiempo $t + \Delta T$ de las variables internas del estado actual en el momento t .

La fricción y el desgaste para los parámetros de los contactos deslizantes se determinan en diferentes escalas de prueba, a partir de ensayos con modelos simplificados, donde el contacto de par se sustituyen con modelos simplificados, a las pruebas de campo completo, donde el sistema se prueba bajo condiciones reales.

Pocos estudios han examinado el tamaño, la forma o composición elemental con que los discos de freno se corroen rápidamente dependiendo de las condiciones a las cuales este está enfrentado. Se han desarrollado investigaciones de cómo los frenos a través de la fricción presentan fallas a nivel de corrosión y desgaste, además de las altas temperaturas que se producen afectando las propiedades mecánicas del material.⁴

² **ERIKSSON, Marcus.** On the nature of tribological contact in automotive brakes. *Wear* 252. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 15 de Noviembre de 2013]. p. 26-36.

³ **SÖDERBERG, Alexander y Andersson, Sullivan.** Simulation of wear and contact pressure distribution at the pad-to-rotor interface in a disc brake using general purpose finite element analysis software. *Wear* 267. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 15 de Noviembre de 2013]. p. 2243-2251.

⁴ **BLAU, Petter y Meyer III, Hiler.** Characteristics of wear particles produced during friction tests of conventional and unconventional disc brake materials. *Wear* 255. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 15 de Noviembre de 2013]. p. 1261– 1269.

Tsuchida examinó el efecto de alcohol, en la corrosión de Aluminio puro durante 72 horas a 353°K y 393°K, y encontraron que la corrosión de Aluminio fue acelerada por la mezcla de diferentes tipos de alcoholes. El comportamiento a la corrosión del Aluminio en mezclas de disolventes orgánicos que contienen agua HCl fue reportado por Nabey, y se mostró que la velocidad de corrosión depende de la estructura de la mezcla de agua y alcohol. Zaharieva, trabajo en la corrosión de Aluminio y sus aleaciones en etilenglicol con mezclas de agua, y mostraron significativa acción corrosiva de ácido glicólico y un efecto protector de los ácido sebácico en el Aluminio.

Los alcoholes se calientan durante el funcionamiento de los sistemas de freno, hasta temperaturas de hasta 400°K, y están posiblemente involucrados en las reacciones de alcóxido, lo que resulta en la corrosión de los cilindros de freno de aleación de Aluminio, después de largos periodos de funcionamiento. En la investigación de grupos de trabajo sobre la corrosión de las aleaciones de Al, Sn y Bi en líquidos de frenos se creó en la corrosión.⁵

El mecanizado de aleaciones de Aluminio que contienen Sn y Bi ahora se utilizan en muchas partes de vehículos y productos electrónicos, y cuando las aleaciones se utilizan como el cilindro de freno de los vehículos, serían corroídos tras una larga exposición a fluidos de freno, compuesto de elevado punto de ebullición de los alcoholes a alta temperatura. El aluminio y sus aleaciones son corroídos por los alcoholes.

Tsuchida en un artículo anterior, investigo cuando la corrosión se genera mecánicamente en aleaciones de Aluminio 2-(2-(2-metoxietoxi)etoxi)etanol (MEEE) y 2-(2-(2-butoxietoxi)etoxi)etanol (BEEE) como la componentes principales de los fluidos de freno. Se encontró que la adición de Sn y Bi al Aluminio puro (sin aleaciones de aluminio) mejora la corrosión fuerte a 415°K, mientras que la adición de Sn y Bi al Aluminio, Cu y Al, Mg y Si, son aleaciones que no tiene ningún efecto sobre la corrosión. La mejora de la corrosión por la adición de Sn y Bi al Aluminio puro, se explica en términos de enriquecimiento de Sn y Bi en la superficie de la muestra durante la inmersión, dando lugar a la galvanización de la corrosión.⁶

La formación de la película anódica de óxido por anodización del Aluminio y sus aleaciones generalmente mejora la resistencia a la corrosión, y la técnica puede ser útil en la protección del Aluminio y sus aleaciones en la corrosión con los alcoholes calientes. Ashby, ha investigado la corrosión de las aleaciones de Aluminio disponibles en el mercado de frenos con los fluidos que contienen MEEE, BEEE y polialquilenoglicol como los componentes principales, y se encontró que anodización del Al y Sn, y las muestras de Al, Sn y Bi acelera la corrosión hasta cierto punto dependiendo de la metalografía de los

⁵ **TATSUYA, Kikuchi y Yasuhito Hara.** Corrosion of Al–Sn–Bi alloys in alcohol at high temperatures. Part I: Effects of the metallurgical structure of the alloys and the metal salt additions to alcohol. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 17 de Noviembre de 2013]. p. 1482–1491.

⁶ **FONTANA, Mars.** Corrosion Engineering. Nueva York: McGraw-Hill, 1997. 457 p.

especímenes. Sin embargo, no aclaró por qué se corroen las aleaciones de Aluminio con películas de óxido anódico gruesos en alcoholes calientes.

El espesor de las capas de óxido sobre los discos después de la corrosión se examinó el uso de sondas sin contacto a distancia, y el cambio en el par de frenado se analizó utilizando un solo extremo el freno dinamométrico. Los resultados mostraron que el óxido de espesor sobre el disco se vio afectado por la película fricción en la superficie del disco bruñido, y la oscilación de la fuerza de fricción estaba estrechamente relacionada con la eliminación de las capas de óxido cuando se usaba el freno. El material de baja fricción de acero elimino la capa de óxido más rápido en la primera etapa de la materiales de fricción no sea de acero de manera que se produce pequeña oscilaciones en la fuerza de fricción. Sin embargo, el bajo acero en el material de fricción aumentó la amplitud de la fricción la fuerza en la última etapa de la prueba del freno extendida debido al exceso de DTV (variación del espesor del disco). Por otra parte, el material de fricción que no es de acero produjo una fricción más grande en la fuerza de las oscilaciones en la primera etapa con la amplitud y la disminución en la fase posterior de aplicación del freno debido a la eliminación de la película de óxido.⁷

El disco de hierro o fundición gris se ha usado ampliamente en un automóvil en el sistema de frenado, en las primeras etapas de desarrollo del vehículo. Debido a su alta conductividad térmica, buena resistencia al desgaste, resistencia, facilidad de fabricación, y relativamente bajo costo. A pesar de estas propiedades favorables, sin embargo, el comportamiento de la corrosión de hierro fundido sigue siendo un problema ya que a menudo contribuye a una situación indeseable llamado judder del freno.⁸

La capa de óxido formada en el disco de fundición gris por la corrosión, se elimina fácilmente durante varios frenados cuando el material de fricción es agresivo. Por otra parte, cuando se utilizan materiales de fricción no agresivos, como tipos bajos de acero dulce no de acero, o la capa de óxido se mantiene en la superficie del disco durante un período prolongado de tiempo durante la aplicación del freno, lo que puede conducir a la corrosión inducida la inestabilidad de fricción. Se investigó que los materiales de fricción comerciales a menudo causan grandes variaciones de pares de fuerza durante la aplicación del freno debido a la superficie del disco corroída. Por lo tanto, el mecanismo de la fricción a la corrosión inducida por la fuerza de oscilación y su metodología preventiva tiene atraído una considerable atención por parte de los diseñadores de frenos para vehículos.⁹

Se han realizado una serie de estudios experimentales para mejorar la resistencia a la corrosión de hierro de fundición gris por el control de los parámetros metalúrgicos y de

⁷ HAUG, Tore y Rebstock, Kehl. New material technologies for brakes. USA. Septiembre, 2009, vol. 4. Advanced brake technology.

⁸ TATSUYA, Kikuchi y Yasuhito Hara. Corrosion of Al–Sn–Bi alloys in alcohol at high temperatures. Part I: Effects of the metallurgical structure of the alloys and the metal salt additions to alcohol. [En línea]. [http://www.sciencedirect.com/]. [Citado el 17 de Noviembre de 2013].p. 1372–1331.

⁹ SHIN, Min y Cho, Khong. Friction Instability Induced by Corrosion of Gray Iron Brake Discs. [En línea]. [http://www.sciencedirect.com/]. [Citado el 17 de Noviembre de 2013]. p. 21-25.

modificación de superficie. Los discos con nuevas aleaciones generalmente no han tenido éxito debido a que los elementos de aleación para la resistencia a la corrosión a menudo reducen la longitud de escamas de grafito, y las capas superficiales de protección no son lo suficientemente resistente en aplicaciones de frenos bajo condiciones severas. Sin embargo, hay pocos informes de la correlación entre el hierro de fundición gris, el freno de disco y el efecto de la corrosión.

Los discos de freno con materiales alternativos, tales como materiales compuestos de matriz metálica, materiales compuestos a base de carbono, y materiales compuestos de matriz de cerámica, se han desarrollado como una sustitución en los discos de fundición gris. Sin embargo, los recientes estudios desarrollados requieren verificación de rendimiento a fondo antes de que puedan ser aceptados como productos comerciales.¹⁰

El coeficiente de fricción debe ser relativamente alto, pero lo más importante estable. Se debe mantener un nivel estable con independencia de la temperatura, la humedad, la edad, el grado de desgaste y corrosión, la presencia de polvo y chorros de agua desde la carretera, etc. Además de estos requisitos de seguridad, vienen los requisitos para una larga vida y un alto confort, es decir, ausencia de vibración, ruido y chirrido. La enorme importancia técnica del sistema de fricción y sus desviaciones significativas de la mayoría de situaciones de tribología, son situaciones de contacto que motiva a un estudio sobre la naturaleza del contacto tribológico en frenos de automóviles.¹¹

En este estudio también tiene lugar los cojinetes en el chirrido del freno. En un comentario sobre el ruido y la vibración del freno, Crolla y Lang declaró que la clave para seguir avanzando en el análisis del problema del ruido de frenos y su aplicación fructífera de diseño de frenos real radica en el desarrollo de mejores elementos finitos modelos y en particular, en la búsqueda de una forma precisa de representando los términos de acoplamiento de fricción.¹²

El propósito principal de un freno de automóvil es reducir la velocidad. En este proceso, la energía cinética se transforma en calor por el trabajo de fricción. El freno de los automóviles experimentan deslizamiento seco en contacto con en más o menos 50 % de la velocidad del automóvil. Una típica pastilla de freno delantero es de unos 8 cm de largo y 5 cm de ancho y el disco de freno tiene un diámetro de 28 cm. La almohadilla cubre alrededor 10-15 % de la superficie de fricción correspondiente del disco.

Durante frenadas normales, relativamente suaves la fuerza de presión la almohadilla contra el disco es de aproximadamente 5 kN, lo que resulta en un valor nominal presión en la superficie de la almohadilla justo por encima de 1,2 MPa. En extremas situaciones, la

¹⁰ **JANG, Hyun y Yoon, Jang.** The effect of the composition and microstructure of gray cast iron on preferential wear during parasitic drag and on intrinsic damping capacity. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 17 de Noviembre de 2013]. p. 12-23.

¹¹ **BLAU, Petter y Jolly, Box.** Tribological investigation of titanium-based materials for brakes. Wear 263. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 17 de Noviembre de 2013]. p. 1202-1211.

¹² **ASM.** International Handbook Committee ASM, Corrosion. Vol. 13. Handbook, 1992, 11 p.

presión podría ser cerca de 10 MPa. Durante frenadas duras, la disipación de potencia en una pastilla de freno fácilmente exceda de 30 kW. Estas altas densidades de energía como resultado muy altas temperaturas de la superficie y por lo tanto ponen exigencias especiales en los materiales de fricción.¹³

Todas las observaciones son parte de un proyecto sobre la generación del chirrido de los frenos. Como el chirrido de los frenos por lo general se produce a bajas velocidades y a presiones moderadas el freno se ha diseñado con equipo de prueba principalmente para esta aplicación. Esto significa que los frenos sólo han estado expuestos al frenado en condiciones de velocidades relativamente bajas (0-25 km/h) realizado en la atmósfera de laboratorio con la humedad ambiente y temperatura casi constante (20-25°C).

Las mediciones muestran que las mesetas contacto normalmente pueden exhibir valores de dureza considerablemente más alta que la media dureza de la almohadilla compuesta (por ejemplo, en comparación 3000 MPa con 200 MPa). Esto es debido a las mesetas siendo típicamente formado por fibras de metal rodeados por los constituyentes más suaves compactados.

Los componentes de revestimiento muestran muy diferentes propiedades de desgaste, fibras de acero (y otros componentes estructurales y partículas abrasivas) tienen una relativamente alta resistencia al deslizamiento desgaste contra el disco.

La mayor proporción del transporte de carga será posteriormente conducir a los componentes resistentes al desgaste que tiene una mayor influencia en el coeficiente de fricción que se indica por su fracción de volumen. Por lo tanto, a pesar de los componentes más blandos llenar la mayor parte del volumen revestimiento, en el contacto situación está dominada por el contacto de metal con metal con respecto a tanto la fricción y el desgaste.¹⁴

Las mesetas de contacto pueden crecer mediante procedimientos que implican aglomeración y compactación del desgaste de las pastillas escombros alrededor el sitio de nucleación. La tendencia a que el escombros a pegarse a la meseta depende de la temperatura, la humedad y también en el estado predominante de la cizalladura y presiones normales. Los procesos de deterioro son acelerados por los repetidos ciclos de temperatura. La meseta también puede contraerse debido a la desintegración y la eliminación de los desechos compactados causado por los cambios en la situación de contacto. La meseta de contacto finalmente se desintegra cuando la fibra o partícula protectora ha sido gastada por la distancia de recorrido.¹⁵

¹³ **JACOBSON, Roberta.** On the nature of tribological contact in automotive brakes. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 17 de Noviembre de 2013]. p. 156-161.

¹⁴ **JACOBSON, Roberta.** Applications of a new model for the abrasive wear resistance of multiphase materials, composites and coated materials. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 17 de Noviembre de 2013]. p 1459-1463.

¹⁵ **BERGMAN, Fritz, Eriksson, Marcus y Jacobson, Roberta.** A software based measurement system for test and analysis of automotive brake squeal. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 17 de Noviembre de 2013]. p 834-840.

La funcionalidad requerida para compuestos de fricción está estrechamente relacionada con la selección adecuada de los componentes de estos cuatro grupos. El ingrediente metálico aumenta la resistencia al desgaste, la dureza de los materiales y compuestos, mejorar su difusividad térmica, y también juegan un papel importante en la formación de mesetas de contacto principal. Estas mesetas están en contacto directo con la contraparte giratoria (Típicamente expulsar hierro del disco) y transferir la presión (Normalmente de 1,2 MPa durante suave frenado y 10 MPa en situaciones extremas) que se origina durante el frenado. La almohadilla cubre aproximadamente el 10 % de la correspondiente frotando la superficie y mesetas contacto cubren normalmente del 15 al 20% de una superficie de forros de freno. La función de los homólogos de frenado es para desacelerar la velocidad de un vehículo, mientras que la energía cinética de rotor se transfiere en energía térmica lo que se refleja en el aumento de la temperatura en el par de frenado.¹⁶

La alta temperatura en la superficie de fricción, junto con el contacto deslizante directo de la guarnición de freno con el rotor son responsables de las reacciones Mecano-Químicas, en este caso las reacciones triboquímico que se producen durante el frenado. Debido a la compleja composición de las pastillas de freno, es difícil de describir todas las reacciones triboquímico en detalle. Un fenómeno típico que ocurre a menores temperaturas es una degradación de la resina fenólica. La temperatura de inicio de degradación de la resina fenólica es dependiente de su naturaleza, modificación, y la presencia de metales que actúan como catalizadores para su degradación. Otras reacciones reportadas como triboquímico comprenden la oxidación de los componentes metálicos, por ejemplo hierro o cobre.¹⁷

Los cambios químicos y la fase inducida por el proceso de fricción los compuestos de fricción que contienen Stibnite (Sb_2S_3) y molibdenita (MOS_2) como los lubricantes sólidos y su efecto en el rendimiento de fricción y desgaste fueron estudiados por Filip. Los autores no observaron cualquier oxidación de Stibnite durante el proceso de fricción, aunque la temperatura alcanzó los 700°C. Filip sugiere que la formación de óxidos de antimonio a temperaturas elevadas ocurre el fenómeno y se desvanecen.¹⁸

Un número considerable de discos de freno de los vehículos de extinción de incendios utilizado en el apoyo a las actividades aeronáuticas fueron encontrados grietas. La Macrofractografía de los discos, fabricados en hierro de fundición gris, mostró varias grietas corriendo a lo largo del radio de las superficies de fricción que tienen una longitud aproximadamente en el rango de 1-7,5 cm. Además grietas por examen mediante

¹⁶ **MATEJKAA, Vaculik.** Possible stibnite transformation at the friction surface of the semi-metallic friction composites designed for car brake linings. *Wear*. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 17 de Noviembre de 2013]. p. 26-36.

¹⁷ **CRISTOL BULTHE, Andru.** Mechanical and chemical investigation of the temperature influence on the tribological mechanisms occurring in OMC/cast iron friction contact. *Wear* 264. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 17 de Noviembre de 2013]. p. 815–825.

¹⁸ **FILIP, Peter y Weiss, David.** On friction layer formation in polymer matrix composite materials for brake applications. *Wear* 252. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 17 de Noviembre de 2013]. p. 189–198.

microscopio óptico y de emisión de campo microscopio electrónico de barrido (FESEM) reveló las grietas se propagaron en forma semielíptica a través del espesor de las superficies de fricción de acuerdo con un mecanismo de fatiga térmica. También se observaron zonas que mostraron signos definidos de calefacción. Además, no hay señales de defectos que pudiera tener su origen no se encontraron las rendijas. Los discos se encuentran para ser confirmados a la química, microestructural y mediciones de dureza en los requisitos para el material seleccionado. El análisis de elementos finitos (FEA) se lleva a cabo para determinar el perfil de temperaturas en el disco, así como para estimar la distribución de tensiones durante el frenado, también se confirmó que las temperaturas relativamente altas alcanzadas durante las acciones de frenado y atribuido a la tensión de tracción residual fue debido a la repetición de la tensión térmica en ciclos que produce la causa de las grietas, respectivamente.¹⁹

En condiciones de operación severas en términos de alta velocidad con cargas fuertes frenadas y los gradientes de temperatura elevada junto con la continua exposición al medio ambiente pueden afectar la operatividad y el funcionamiento de discos de freno forjado y fundido de vehículos automóviles, tales como automóviles de pasajeros, camiones, motocicletas, etc., causando su falla por fatiga térmica.

Análisis de elementos finitos (FEA) para determinar el perfil de temperatura y para estimar el Von Mises destaca así mismo se realizó la distribución que surgen durante el frenado. Los resultados indicaron las grietas eran producido por la fatiga térmica durante las etapas de calentamiento y enfriamiento de las acciones de frenado. En particular, debido al gradiente térmico producido a través del grosor del rotor, la tensión de tracción residual se produjo durante el enfriamiento que se generó. Además, (FEA) ha demostrado tal tensión se localiza principalmente en la dirección radial de la superficie de fricción en el borde de los orificios de refrigeración y los discos fueron expuestos a temperaturas relativamente altas.²⁰

Las aleaciones de titanio y sus compuestos tienen el potencial de reducir el peso de los componentes del disco de freno y mejorar su resistencia en la carretera que produce la sal con el deshielo y por ende la corrosión. Un rotor de aleación de titanio puede pesar aproximadamente 37% menos de un rotor de hierro fundido convencional con las mismas dimensiones, mientras que ofrece buena resistencia a alta temperatura y mucha mejor resistencia a la corrosión de las sales de deshielo de carreteras. Los coeficientes de fricción y los datos de aumento de temperatura se obtuvieron por dos aleaciones comerciales Ti, cuatro materiales compuestos de partículas duras basados en Ti experimentales, y una aleación térmicamente se recubrieron por pulverizado Ti.²¹

¹⁹ **BAGNOLI, Freddy.** Thermal fatigue cracks of fire fighting vehicles gray iron brake discs. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 18 de Noviembre de 2013].p. 152–163.

²⁰ **KIM, Dhen., y Lee, Yong.** Thermal stress analysis for a disc brake of a railway vehicles with consideration of the pressure distribution on a frictional surface. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 18 de Noviembre de 2013].p. 294-296.

²¹ **FINDIK, Fehin.** Tribological properties of some phenolic composites suggested for automotive brakes. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 18 de Noviembre de 2013].p. 317–325.

Si los vehículos están hechos para rodar más fácilmente, también se vuelven más difíciles de parar, de tal modo se llevaron a cabo varios proyectos para investigar alguna alternativa como materiales ligeros que podrían mejorar la eficacia de frenado al tiempo que contribuye a la eficiencia energética. Estos materiales de compuestos cerámicos incluidos y los materiales de carbono y grafito que han encontrado un uso limitado pero creciente de alta velocidad.²²

2.1.1.2 A nivel nacional. No se reportan estudios o investigaciones realizadas a los discos de frenos de los vehículos en lo que concierne a la aceleración en el proceso de corrosión.

2.2 MARCO CONCEPTUAL.

2.2.1 Sistema de frenos en el Automóvil. El freno de disco es un sistema de frenado normalmente para ruedas de vehículos, en el cual una parte móvil (el disco) conjunto con la rueda que gira, es sometido al rozamiento de unas superficies de alto coeficiente de fricción (las pastillas) que ejercen sobre ellos una fuerza suficiente como para transformar toda o parte de la energía cinética del vehículo en movimiento, en calor, hasta detenerlo o reducir su velocidad, según sea el caso. Esta inmensa cantidad de calor ha de ser evacuada de alguna manera, y lo más rápidamente posible. El mecanismo es similar en esto al freno de tambor, con la diferencia de que la superficie frenante es menor pero la evacuación del calor al ambiente es mucho mejor, compensando ampliamente la menor superficie frenante. En la Figura 2, se muestra una breve descripción de los componentes de los frenos.²³

Disco de freno. El disco de freno es el elemento que se encuentra unido al buje de la rueda o forma parte de él, girando conjuntamente con la rueda y constituyendo, por tanto, el elemento móvil del sistema de frenado.²⁴

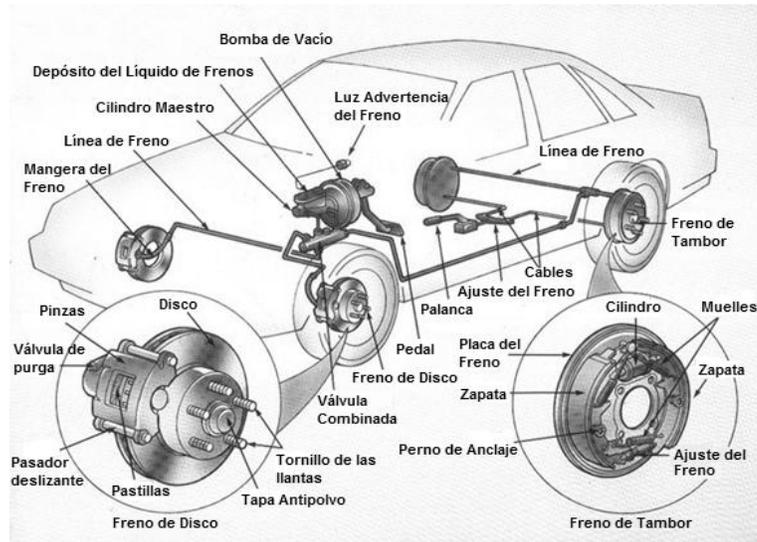
Contra la superficie del disco de freno interactúan las pastillas de frenos en su objetivo de detener el vehículo. El rozamiento continuo que se establece entre pastillas de freno y disco es el que produce la transformación de la energía cinética que acumula el vehículo debido a su velocidad en energía calorífica, con el consiguiente aumento de la temperatura del sistema.

²² **BLAU, Petter.** Compositions, Functions, and Testing of Friction Brake Materials and Their Additives, Oak Ridge National Laboratory Technical Report ORNL/TM. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 18 de Noviembre de 2013]. p. 24-27.

²³ **CRIADO, Elena.** Diseño y cálculo del sistema de frando para un prototipo formula student. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Leganes, España.: Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Mecánica, 2012. p. 28-34.

²⁴ **PUHN, Fred.** Brake HandBook. USA: HP Books, 2000. 23-27 p.

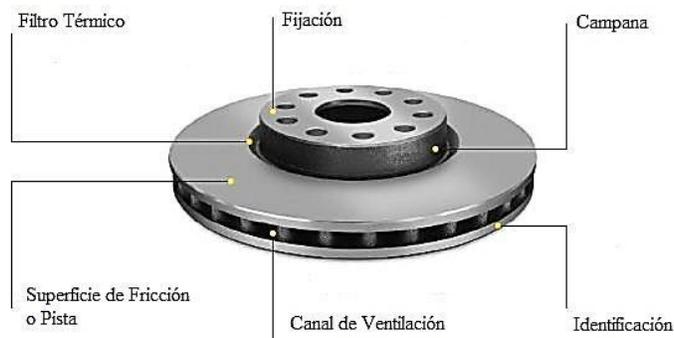
Figura 2. Componentes de un sistema de freno.



Fuente. Brake HandBook.

Geometría de los discos de freno. La propia constitución geométrica de los discos, en forma de platos con una gran superficie expuesta y ventilada que permite la refrigeración continua, y la posibilidad de evacuar todo el calor generado a causa del rozamiento, que si no ocurriera produciría el colapso del sistema.²⁵ El cual está compuesto de las siguientes partes:

Figura 3. Estructura de un disco de freno ventilado.



Fuente. Brake HandBook.

²⁵ **PERO SANZ, Jose.** Aceros: Metalurgia Física, Selección y Diseño. Madrid, España: Editoriales Dossat, 2000. 159 p.

Se caracterizan fundamentalmente por constituirse por una superficie circular plana a la cual los distintos fabricantes han ido continuamente aportando modificaciones y soluciones encaminadas a mejorar en lo posible la disipación de calor que se genera en el disco durante la frenada, de las cuales se distinguen las siguientes:

Superficie de fricción o pista: Es la superficie en la que se friccionan las pastillas y el disco. Está dimensionada de manera que la potencia de disipación se aproxime a 250 W/cm^2 , pero la potencia puede aumentar, todo depende la geometría del disco, ya que si este es ventilado el valor de la potencia de disipación alcanza 750 W/cm^2 .

Fijación: Está situada en la parte central, existe un agujero donde se aloja el buje, y en la parte trasera se ha practicado un chaflán para apoyar el disco perfectamente en la mangueta. Alrededor del agujero donde se aloja el buje, se ha practicado unos agujeros de menor tamaño que permite el paso de los pernos de anclaje de la rueda.

Campana: La campana es el cilindro que une la banda, con el plato de fijación al eje del vehículo.

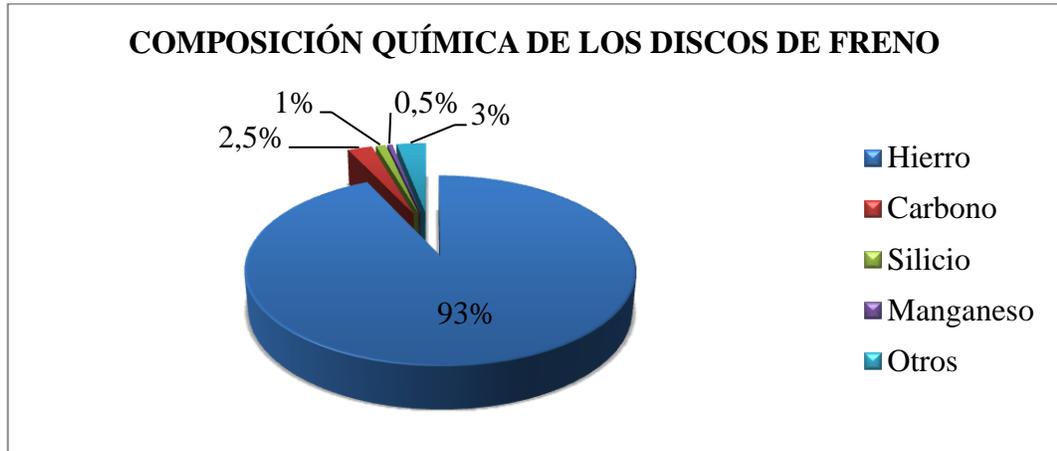
Filtro térmico: Se trata de un canal mecanizado que separa la pista de la fijación para reducir el calor que pasa de la pista hacia la campana. Con este tipo de canales se evita el excesivo calentamiento de la llanta y por consiguiente del neumático.

Canales o ductos de enfriamiento: Es una zona aleteada para mejorar la evacuación de calor del disco, evitando así un sobrecalentamiento del mismo. Estos ductos se encuentran en los discos ventilados.

Los discos ventilados están compuestos de dos pistas separadas por canales o ductos en su interior. Estos ductos 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 en gran medida de la forma y la orientación de las aletas, ya que en algunos casos las aletas se oponen al movimiento del aire en su denominado filtro térmico. Si se reduce la sección de paso de calor, el gradiente térmico aumenta, es decir, la diferencia de temperatura entre un lado del canal y el otro se hace mayor, lo cual hace que la temperatura de la campana sea menor. Esto es muy importante ya que el calor que se transfiere a la llanta y por consiguiente a la goma del neumático es menor, consiguiendo así que no sufra en exceso la carcasa del neumático. También se consigue una reducción en la deformación del disco al reducirse la temperatura de la campana y sus consiguientes tensiones térmicas.

Composición química. La composición básica del material de los discos es una fundición gris nodular de grafito laminar, que contiene entre un 92% y un 93% de hierro. Esta aleación ferrosa contiene en general más de 2% de carbono, más de 1,4% de manganeso, menos de 0,6% de silicio y otros que confieren las propiedades específicas del elemento.

Grafica 1. Composición química del disco de freno.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

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

Grafica 2. Composición de la pastilla de freno.



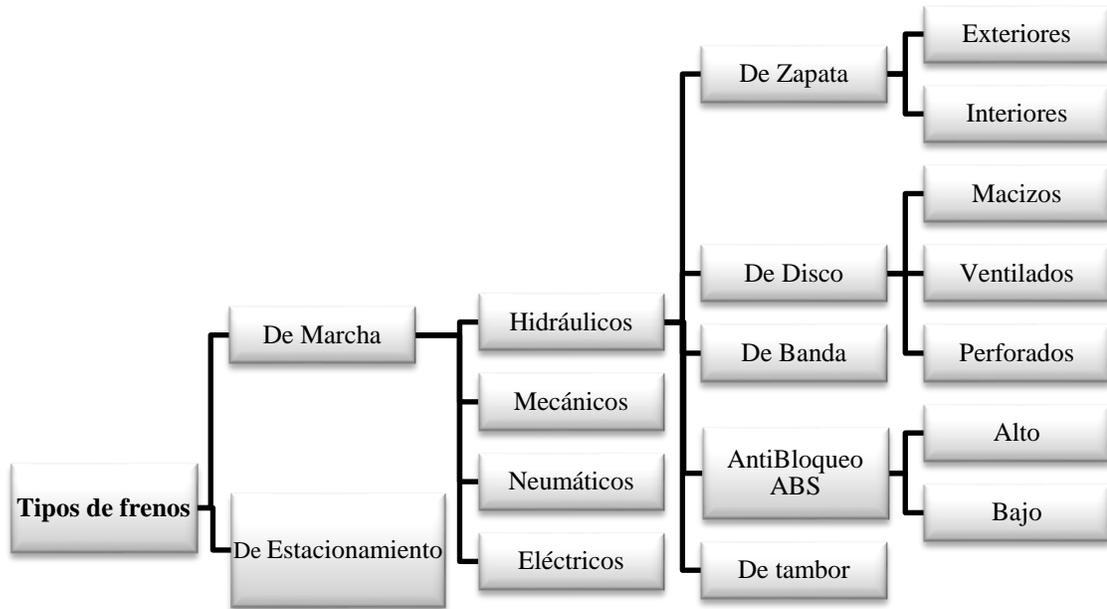
Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Tabla 1. Componentes de un freno.

COMPONENTES	DESCRIPCIÓN
Servofreno	El servofreno es el sistema por el cual la fuerza necesaria que hay que realizar sobre el pedal, para presurizar el circuito hidráulico a una misma presión, se reduce.
Bomba de freno	La bomba de freno o cilindro principal, es el encargado de presurizar el líquido por todo el circuito hidráulico.
Corrector de frenada	Los limitadores de frenada o correctores de presión tienen la función de reducir la presión que llega al tren trasero con el fin de que no se llegue al bloqueo en esas ruedas.
Pinza de freno	La pinza de freno es el elemento encargado de soportar las pastillas además de empujarlas contra el disco cuando se presuriza el sistema. La pinza es un elemento crítico del sistema de freno y está sometida a esfuerzos importantes durante el frenado tales como vibraciones, excesiva temperatura y otros elementos agresivos.
Disco de freno	Los discos de freno son la superficie contra la que interactúan las pastillas para producir la deceleración del vehículo. El rozamiento entre las pastillas y los discos de freno, produce la transformación de energía cinética en energía calorífica, provocando la reducción de la velocidad del vehículo.
Pastillas de freno	Las pastillas de freno son el elemento del sistema de frenado que, junto con el disco de freno, van a producir la fricción necesaria para la desaceleración del vehículo.
Conductos y latiguillos	Los conductos y los latiguillos son los encargados de conducir el líquido de frenos soportando la presión interna del líquido, además deben resistir la agresión medioambiental y otros agentes agresivos del entorno. Los conductos de freno normalmente son tubos de acero y muchas veces están recubiertos con polímero para resistir la corrosión.
Líquido de frenos	El líquido de frenos es un líquido hidráulico que hace posible la transmisión de la fuerza ejercida sobre el pedal de freno a los cilindros de freno en las ruedas. Se trata de un líquido sintético elaborado a base de glicóteres y aditivos inhibidores seleccionador para proteger el sistema hidráulico de frenos, ya sean de disco o de tambor, contra la oxidación y la herrumbre.

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Figura 4. Tipos de frenos de los vehículos.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Tabla 2. Propiedades Físico-Mecánicas de los discos de freno.

PROPIEDAD	VALOR
Peso del vehículo a plena carga	1250 – 1950 – 2250 Kg
Distribución delantera/trasera	70% - 30%
Superficie de la pastilla	3546.03 mm ²
Velocidad del vehículo	80 km/h
Deceleración al frenar	0.6 m/s ²
PRESION DENTRO DEL DISCO	
Presión debido a la fuerza centrífuga	0.73 N/mm ²
Esfuerzo de compresión	2205 N/mm ²
Fuerza frenante en el centro del empuje	9626 – 15016 – 17326 N
Esfuerzo de tracción debida a la fricción	122 N/mm ²
PROPIEDADES FISICAS	
Resistencia a la tracción	240 N/mm ²
Dureza	170-250 HB

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

2.2.2 Problemas principales asociados a los discos de freno. El estudio de los diferentes problemas de los discos demuestra que la mayoría de los mismos podrían evitarse si se prestara más atención al montaje. Esto no solo concierne a ciertos controles cuantificables mediante mediciones, sino que además debemos realizar un atento examen visual de los componentes. La solución a todos los problemas, que en este apartado se describen, es la sustitución de ambos discos así como las pastillas.²⁶

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

Montaje incorrecto de la pinza. Si la pinza no ha sido colocada correctamente en su posición se aprecia un desgaste irregular de las pastillas en forma cónica y anti simétrica, como se observa en la Figura 5.

Figura 5. Falla de disco por montaje incorrecto de la pinza.



Fuente. Manual técnico de la pastilla de freno (Discos de frenos).

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

Excesiva holgura de los rodamientos del buje. La excesiva holgura de los rodamientos del buje provoca un desgaste irregular de las bandas frenante de los discos. En

²⁶ **ROADHAUSE.** "Manual técnico de la pastilla de freno (Discos de frenos)". [En línea]. [<http://www.imporbrake.com/manuales/Cap3.pdf>]. [Citado el 18 de Noviembre de 2013],p 10-35.

la Figura 6 se observa un recalentamiento del disco localizado en la zona donde rozan las pastillas al girar el disco, debido a la holgura en los rodamientos del buje. Además se aprecia un desgaste excesivo en la zona en la que el contacto es permanente. Se manifiestan vibraciones frecuentes desde el principio hasta que cada vez sean más graves.

Figura 6. Falla por holgura en los rodamientos.



Fuente. Manual técnico de la pastilla de freno (Discos de frenos).

Temperatura excesiva. Los discos presentan vivos colores en la gama de los azules, que principalmente son visibles en la zona del filtro térmico donde se unen las pistas frenantes con la campana. Esta zona cambia de color al sufrir un calentamiento excesivo que transforma la estructura del material, como se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Falla de disco por temperatura excesiva.



Fuente. Manual técnico de la pastilla de freno (Discos de frenos).

Desgaste por encima del límite máximo. Cuando el disco ha sido usado más allá de su vida útil, es decir, cuando se han sobrepasado el espesor mínimo expresado por el fabricante, aparece un escalón en las pistas del disco que provoca una reducción de la masa del disco. Esto produce la mala disipación del calor debida a la pérdida de masa

comentada anteriormente. Lo que llevará a un calentamiento excesivo, provocando la aparición de grietas, así como manchas de color más oscuro debido al sobrecalentamiento de dichas zonas, como se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Falla por desgaste excesivo del disco.



Fuente. Manual técnico de la pastilla de freno (Discos de frenos).

Discos agrietados. Los discos han sido sometidos a temperaturas de funcionamiento muy altas. En la parte exterior del disco se ven claros síntomas de sobrecalentamiento. Las altas temperaturas favorecen la aparición de las grietas, las cuales se forman al existir pequeños poros en el material, los cuales debido a las altas temperaturas, crecerán hasta forman la grieta. Las grietas hacen que el disco sea frágil, lo cual en definitiva, favorece el crecimiento de la grieta hasta romper el disco, como se muestra en la Figura 9.

Figura 9. Falla por agrietamiento.



Fuente. Manual técnico de la pastilla de freno (Discos de frenos).

Desgaste excesivo de los discos debido al desgaste total de las pastillas. Si las pastillas se han desgastado tanto que ha llegado haber un contacto metal – metal entre el disco y el soporte de la pastilla, se aprecia un desgaste muy abrasivo que deja unos surcos muy pronunciados, también se observa transformación de material entre el disco ya que aparecen zonas oscuras que se observa en la Figura 10.

Figura 10. Falla por desgaste excesivo de las pastillas.



Fuente. Manual técnico de la pastilla de freno (Discos de frenos).

Disco dañado por material de fricción vitrificado. Este problema es causado por materiales de fricción de baja calidad y en vehículos muy exigentes con el freno; debido a sus altas prestaciones, al ser vehículos dedicados al reparto u otras condiciones extremas impuestas por el conductor, que se observa en la Figura 11.

Figura 11. Falla por cristalización de las pastillas.



Fuente. Manual técnico de la pastilla de freno (Discos de frenos).

Surcos y rayas profundas. La formación de rayas o surcos profundos pueden haber sido causados por la interposición de diferentes materiales extraños entre la pastilla y el disco.

Pueden provocadas por una acumulación del material duro de la pastilla al tener un mal proceso de mezclado o elementos extraños durante la movilización del vehículo, como se muestra en la Figura 12.

Figura 12. Falla de disco por ralladuras y surcos.



Fuente. Manual técnico de la pastilla de freno (Discos de frenos).

Depósitos de material de fricción en los discos. Se forman depósitos del material de fricción sobre el disco que se han quedado adheridos sobre el mismo debido a una alta temperatura. Se aprecian vibraciones muy leves en un principio y dependiendo de la presión de frenado. Que se observa en la Figura 13.

Figura 13. Falla por depósitos de material en los discos.



Fuente. Manual técnico de la pastilla de freno (Discos de frenos).

Efecto Judder en los discos. El judder “frío” (cold judder) estas vibraciones son provocadas por imperfecciones de los discos tales como defectos de mecanizado en origen, o por defectos de montaje, holguras excesivas. Esto significa, todas aquellas causas que provoquen un aumento de la deformación del disco. Este cold judder se suele ocasionar a baja presión y baja deceleración, que se observa en la Figura 14.

El judder “caliente” (hot judder). Son vibraciones que aparecen a alta temperatura durante procesos de frenado a presiones medias y velocidades altas ya que las frenadas en estas condiciones se alargan mucho en el tiempo, y la temperatura aumenta bastante hasta valores de 400°C a 500°C, que se observa en la Figura 14.

Figura 14. Manchas por Cold y Hot Judder en los discos.



Fuente. Manual técnico de la pastilla de freno (Discos de frenos).

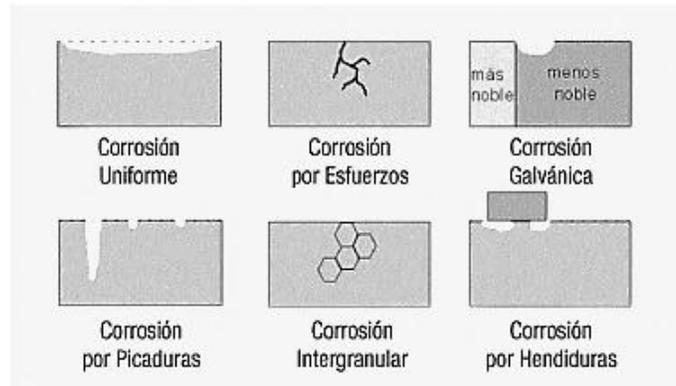
2.2.3 Corrosión. La corrosión es un fenómeno espontáneo que se presenta prácticamente en todos los materiales procesados por el hombre. Sin embargo existen varias definiciones, es común describir la corrosión como una oxidación acelerada y continua que desgasta, deteriora y que incluso puede afectar la integridad física de los objetos o estructuras. Este fenómeno tiene implicaciones industriales muy importantes; la degradación de los materiales provoca interrupciones en actividades fabriles, pérdida de productos, contaminación ambiental, reducción en la eficiencia de los procesos, mantenimientos y sobre-diseños costosos. Por esta razón, cada día se desarrollan nuevos recubrimientos, se mejoran los diseños de las estructuras, se crean nuevos materiales, se sintetizan mejores inhibidores, se optimizan los sistemas de monitoreo. Todo esto en un esfuerzo permanente por minimizar el impacto negativo de la corrosión.²⁷

Morfología de la corrosión. La batalla contra la corrosión de los materiales se desarrolla en el campo de la termodinámica, y por eso es una batalla que está perdida. El hombre solamente puede prolongar la vida útil de sus herramientas y estructuras, puede aliarse con la cinética y hacer creer que existen los aceros inoxidables, las pinturas anticorrosivas y los inhibidores de corrosión.²⁸ Maneras que se produce la corrosión:

²⁷ UHLIG'S, Herbert. Corrosion Handbook 2^{da} Edición. Londres: R. W. Revi, 2000. 94 p.

²⁸ BILURBINA, Luis y Liesa, Francisco. Fundamentos de corrosión y métodos de protección. Barcelona: UPC, 1996. 57 p.

Figura 15. Algunos tipos de corrosión comunes.



Fuente. Goldin, Jorge. Curso básico de corrosión.

Corrosión uniforme. Se manifiesta con igual velocidad en todos los puntos del metal. Se observa tanto en el caso de la corrosión seca como cuando se trata de corrosión en medio líquido.

Corrosión por esfuerzo. Este fenómeno ocurre cuando el material se fractura por la presencia de un medio corrosivo. Aquellos materiales que son sensibles a la aplicación de cargas pueden agrietarse cuando están sujetos simultáneamente a esfuerzos y agentes corrosivos específicos en un rango alto de temperatura. Las grietas típicas comienzan en en rendijas interangulares, las cuales aparecen en el metal a través de los granos (grieta transgranular), o entre ellos (intergranular) dependiendo de las condiciones.

Corrosión galvánica. Es un proceso electroquímico en el que un metal se corroe preferentemente cuando está en contacto eléctrico con un tipo diferente de metal (más noble) y ambos metales se encuentran inmersos en un electrolito o medio húmedo

Corrosión por picaduras. Este tipo de corrosión puede tener diferentes causas, en particular la existencia de una solución de continuidad en una capa protectora que recubre el metal, o la presencia en la superficie de pequeñas gotas de un electrolito. Aunque la cantidad de metal atacado sea pequeña, este tipo de corrosión es peligroso, ya que se produce en profundidad y perfora rápidamente gruesas estructuras.

Corrosión intergranular. Se debe generalmente a la precipitación de una fase o a la formación preferente de un producto de corrosión en las juntas de granos. Esta forma de corrosión es un poco engañosa, debido a que la cantidad de metal que se ve afectada por la corrosión es pequeña, pero las condiciones mecánicas del material se ven muy afectadas por la formación de innumerables fisuras que se generan, debilitando al material.

Corrosión por hendiduras. Es el proceso de corrosión acelerado y altamente localizado en lugares como solapas, ranuras dejadas por tuercas o cabezas de tornillos, grietas, etc., donde pequeños volúmenes de fluido son atrapados y puestos en contacto con el material. En general este ataque ocurre en aquellos sitios en los que un metal está sujeto a cambio de condiciones ya sean enterrados o sumergidos.

Erosión. Es el ataque químico mecánico acelerado, que resulta cuando el flujo de material abrasivo continuamente desgasta por acción mecánica y expone material nuevo y no protegido al medio corrosivo. En aquellos casos en que los metales están protegidos por finas películas protectoras antióxido, estos son removidos por la alta velocidad o flujo turbulento de gases y fluidos aumentándose así la tasa de corrosión.

Efecto de las variables ambientales. La corrosión implica la interacción (reacción) entre un metal o aleación y el ambiente que lo rodea. Las variables ambientales más importantes por las que la corrosión se ve afectada son: el pH (acidez), la fuerza oxidante (potencial), la temperatura (transferencia de calor), y la concentración (constituyentes en disolución). Otro aspecto de importante consideración es la influencia de organismos biológicos.²⁹

Efecto del pH: El concepto del pH está relacionado con la concentración de hidrógeno o cantidad de ácido. Muchas aleaciones de interés comercial forman una capa oxidada que contiene especies del tipo hidróxido cuando se encuentran en presencia de agua. En el caso del acero, la velocidad de corrosión es elevada a pH muy bajo.

Efecto del Potencial: El potencial se relaciona con la capacidad para añadir o retirar electrones del metal en reducir u oxidar su superficie. Algunas aplicaciones prácticas incluyen el incremento de la pasividad alterando la superficie oxidada (protección anódica); o la prevención de la corrosión con la provisión de electrones al metal que está afectado por la corrosión (protección catódica).

Efecto de la Temperatura: La temperatura puede afectar a la corrosión de diversas maneras. Si la velocidad de corrosión está gobernada completamente por el proceso elemental de la oxidación del metal, la velocidad de corrosión crece rápidamente con un incremento de la temperatura.

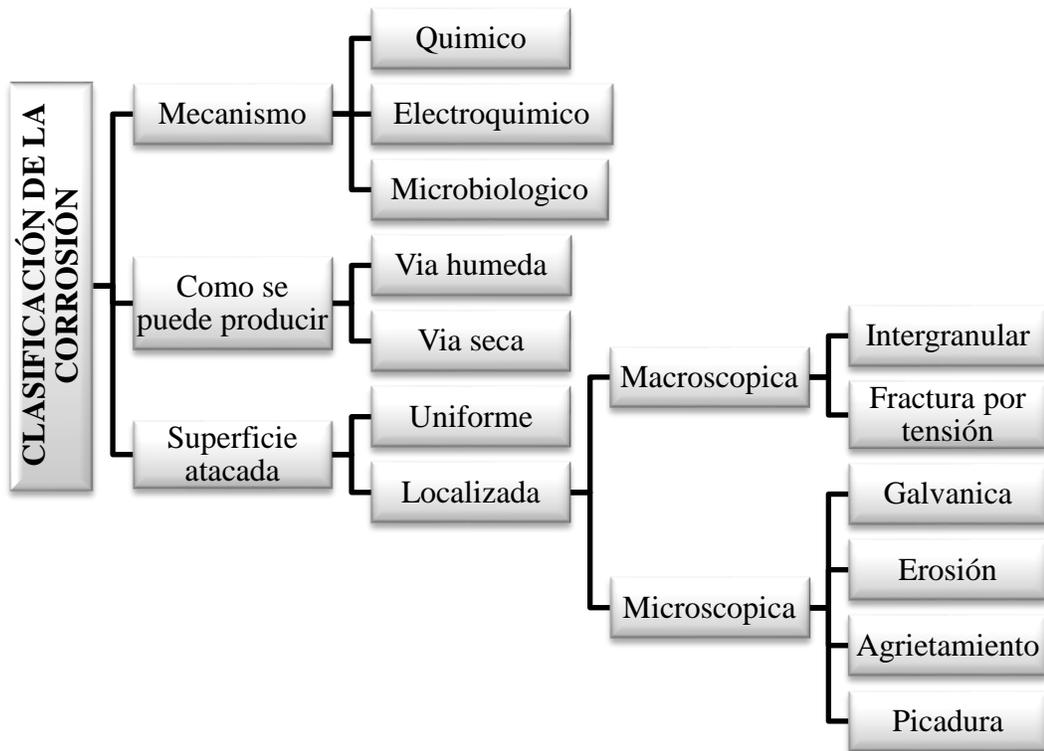
Efecto de la Concentración: De la misma forma que el pH, la concentración de distintos constituyentes puede influenciar en el comportamiento de la corrosión. Por ejemplo, los yoduros y bromuros pueden inhibir la corrosión; mientras que la presencia de cloruros aumenta la velocidad de corrosión de forma proporcional a su concentración.

²⁹ **GOLDIN, Jorge.** Curso Básico de Corrosión. Maturín, Venezuela: Centro Internacional de Entrenamiento y Desarrollo CIED, 1998. 78 p.

Efectos biológicos: La tendencia de estos organismos es atacar y crecer en la superficie del material, dando lugar a la formación de películas biológicas o “biofilms”. Estas películas influyen en la corrosión de los metales ya que los organismos tienen la capacidad de modificar las variables ambientales discutidas previamente.

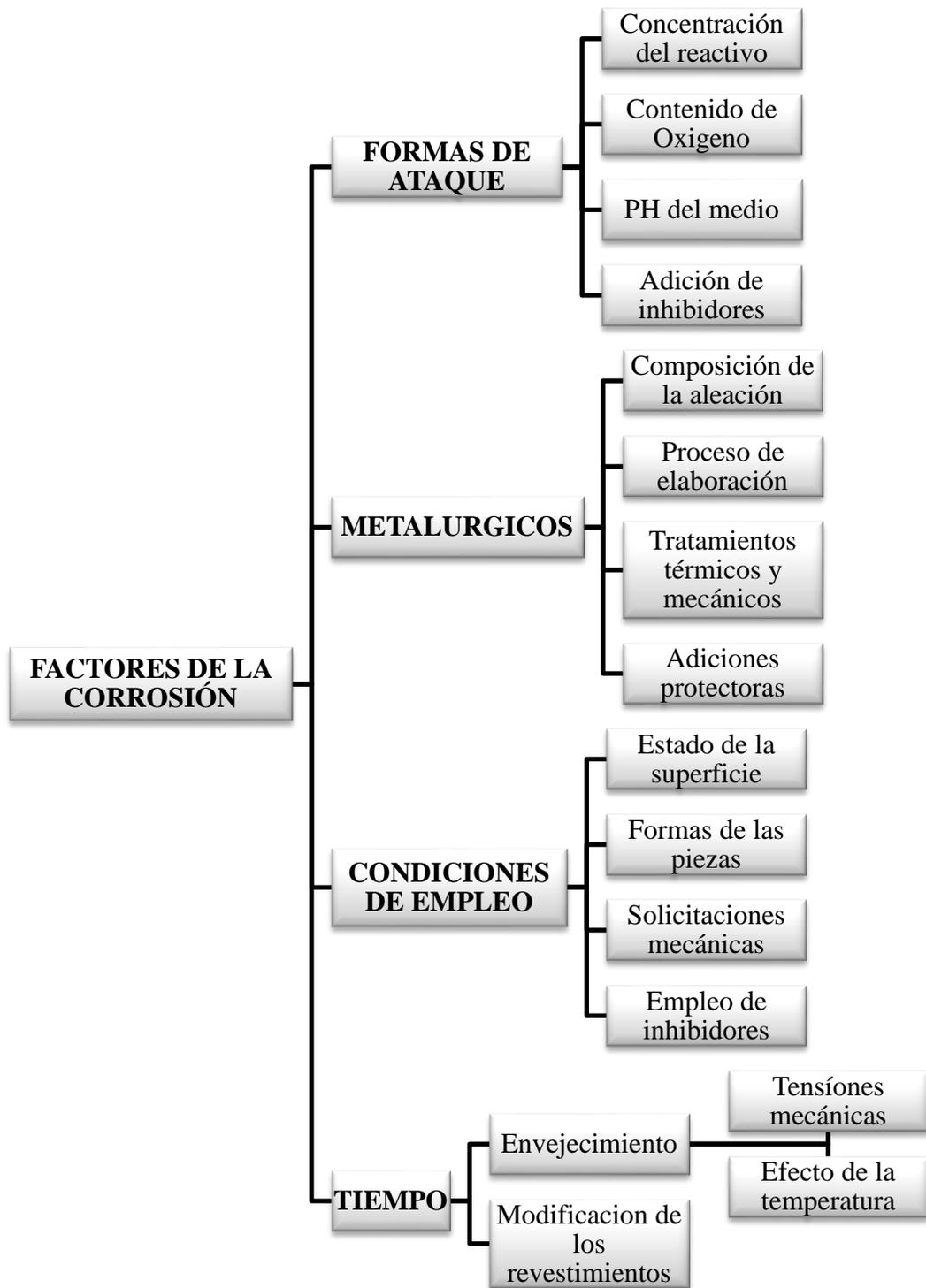
Efecto de las variables metalúrgicas: La estructura y la composición de metales y aleaciones son de básica importancia en la determinación de los procesos de corrosión. Por lo tanto, la estructura cristalina, el tipo de aleación y el tratamiento térmico empleado desempeñan un papel fundamental frente a la corrosión.

Figura 16. Clasificación de la corrosión.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Figura 17. Factores que influyen en la corrosión.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

2.2.4 Metalurgia de los hierros.

Propiedades Físico-Mecánicas. Las principales propiedades ingenieriles y físicas para los hierros son las siguientes: esfuerzo tensil, el módulo de elasticidad, facilidad a la maquinabilidad, dureza, esfuerzo al impacto, resistencia a la fatiga, resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión y abrasión. Dependiendo de las propiedades buscadas cada parte se somete a las pruebas pertinentes para cada propósito. Dentro de la industria automotriz el uso de técnicas y estándares ya establecidos facilitan el diseño de cada componente. Las Normas más usuales para este tipo de industria son la ASTM, AFS, SAE, etc. Entre las más importantes se puede referenciar las de (American Standard Testing Materials ASTM). En la tabla 3, se muestran los principales grados de los hierros para la industria automotriz.³⁰

Tabla 3. Grado de hierros grises automotrices para propósitos de diseño por SAE J431.

Grado SAE	Dureza HB	Esfuerzo Máximo		Otros requerimientos
		Psi	MPa	
G1800	187	18000	124	
G2500	170-229	25000	173	
G2500**	170-229	25000	173	3.4% de carbono mínimo y microestructura especificada.
G3000	187-241	30000	207	
G3500	207-255	35000	241	
G3500b**	207-255	35000	241	3.4% de carbono mínimo y microestructura especificada.
G3500c**	207-255	35000	241	3.4% de carbono mínimo y microestructura especificada.
G4000	217-269	40000	276	

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

Fuente. ASHBY, Michael y Jones, Daniel. Materiales para ingeniería.

En la Tabla 4, se muestran los rangos de durezas para diferentes hierros o fundiciones grises laminares en función de su microestructura y la capacidad al amortiguamiento a las vibraciones para algunas aleaciones ferrosas.

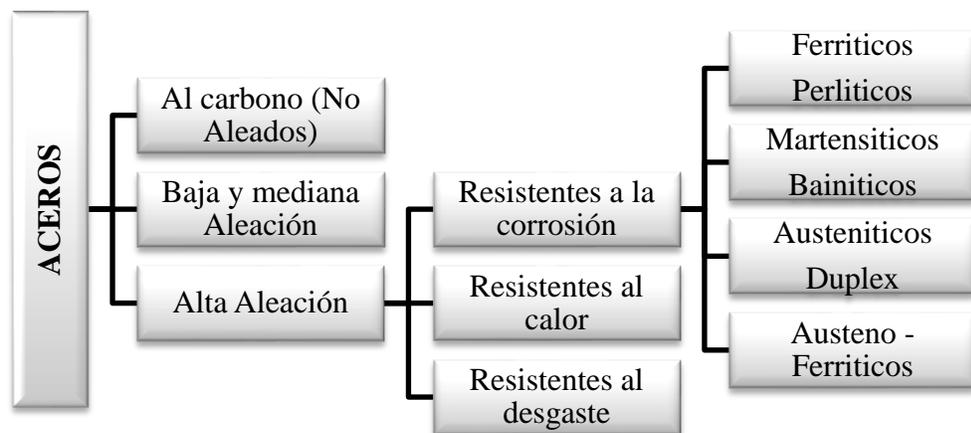
³⁰ ASHBY, Michael y Jones, Daniel. Materiales para ingeniería, Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño. México: Reverte S.A. 2008. 912 p.

Tabla 4. Rangos de dureza para diferentes hierros grises.

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

Fuente. ASHBY, Michael y Jones, Daniel. Materiales para ingeniería.

Figura 18. Clasificación de los aceros.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Morfología y distribución de las hojuelas de grafito en los hierros grises. Las grandes hojuelas de grafito interrumpen seriamente la continuidad de la matriz perlítica, reduciendo de esta manera la resistencia y la ductilidad del hierro gris. Las pequeñas hojuelas de grafito son menos dañinas y por lo tanto, generalmente se prefieren con altos o bajos contenidos dependiendo de la aplicación. La distribución gráfica está clasificada en 5 tipos, como lo muestra la Tabla 5.

Tabla 5. Distribución gráfica.

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

Fuente. ASHBY, Michael y Jones, Daniel. Materiales para ingeniería.

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

2.2.5 Teorías matemáticas. Se realizara un análisis estático, dinámico y térmico del sistema de frenado y del disco de freno utilizando cálculos numéricos para determinar el comportamiento termomecánico con la ayuda del software Ansys y Solid Works, y se hará referencia en las teorías de estática, dinámica, transferencia de calor y maquinas hidráulicas para la solución numérica de los efectos producidos en el disco por la interacción con las pastillas.

Métodos numéricos de transferencia de calor. Los métodos numéricos están basados en las leyes que describen la transferencia de calor y las soluciones analíticas, estas últimas resuelven las ecuaciones diferenciales correspondientes al caso de estudio, proporcionando una solución para cada punto del espacio y tiempo dentro de los límites del problema. Sin embargo, los problemas prácticos implican geometrías y condiciones de frontera complejas, propiedades variables, que no son posibles de resolver de manera analítica. En este caso hay que recurrir a los métodos de análisis numérico, siendo este más eficiente en términos del tiempo necesario para llegar a la solución, también tiene la ventaja de facilitar el cambio de los parámetros, lo que permite que un ingeniero determine el comportamiento de un sistema térmico o que lo optimice con mayor facilidad.³¹

Los métodos numéricos proporcionan soluciones para puntos discretos dentro de los límites del problema y ofrecen una aproximación de la solución exacta. Sin embargo, al ocuparse de la solución para un número finito de puntos discretos, el método se simplifica, al resolver ahora un sistema de ecuaciones algebraicas simultáneas, en vez de la ecuación diferencial. Siendo la solución de ecuaciones simultánea, la tarea ideal para computadores. Esto ocurre mediante la discretización de los dominios en cuestión, siendo la discretización el reemplazo de las ecuaciones diferenciales en un sistema de ecuaciones algebraicas.

Es importante tener en cuenta que se debe discretizar las condiciones limitantes o iniciales especificadas para el problema y que lo que se obtiene del software es una aproximación a la solución exacta, el método numérico puede producir errores en la solución, es por ello

³¹ **PIÑA, Manuel.** Estudio de la influencia de la morfología gráfica sobre las propiedades mecánicas de los discos de freno automotrices. Marzo, 2008. Science Direct, p. 125-128.

que se debe saber cómo calcular y reducir al mínimo estos errores. Los métodos para discretizar las ecuaciones diferenciales de transferencia de calor son:

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

Método de elemento finito (FEM). El método de elemento finito hoy en día es una herramienta poderosa en la solución numérica de un amplio rango de problemas de Ingeniería. Son muchas las aplicaciones, que van desde el análisis por deformación y esfuerzos en automóviles, aeronaves, edificios y estructuras hasta el análisis de los campos del flujo de calor, de fluidos, magnético, filtraciones y diversos problemas de flujo. Con el avance de la tecnología en computadores y sistemas CAD, pueden modelarse problemas complejos con mucha facilidad. El computador permite probar varias configuraciones alternas antes de construir el prototipo. Esto sugiere modernizarse empleando estos desarrollos para entender la teoría básica, las técnicas de modelado y los aspectos computacionales del método de elementos finitos. En este método de análisis, una región compleja que define un continuo se discretiza en formas geométricas simples llamadas elementos finitos. Las propiedades del material y las relaciones gobernantes, son consideradas sobre esos elementos y expresadas en términos de valores desconocidos en los nodos del elemento. El proceso de ensamble, cuando se consideran debidamente las cargas y restricciones, da lugar a un conjunto de ecuaciones las cuales dan una solución aproximada al fenómeno que se está presentado.

2.3 MARCO LEGAL

NORMAS ASTM³²

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

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

ASTM A247-67: Método de prueba estándar para la evaluación de la microestructura del grafito en la fundición de hierro.

³² ASTM. [En línea]. [<http://www.astm.org/>]. [Citado el 25 de Noviembre de 2013]. p 1-3.

Este método de ensayo trata sobre la clasificación de grafito de fundiciones en términos de tipo, la distribución y el tamaño. Este método de prueba pretende ser aplicable para todas las aleaciones hierro-carbono que contiene partículas de grafito, y se puede aplicar a fundición gris, hierros maleables, y el dúctil (fundición nodular).

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

Estos métodos de ensayo cubren las pruebas de tensión del metal en materiales de cualquier forma a temperatura ambiente, en concreto y metales, los métodos de determinación de la resistencia a la fluencia, límite de elasticidad de elongación, resistencia a la tracción, elongación, y la reducción de área.

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

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

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

Estos métodos de ensayo cubren la determinación de la dureza Rockwell y la dureza superficial de Rockwell de materiales metálicos por la hendidura principio de dureza Rockwell. Esta norma establece los requisitos para las máquinas de dureza Rockwell y los procedimientos para realizar pruebas de dureza Rockwell.

3. DISEÑO METODOLOGICO

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Para la realización de este proyecto, se efectuó una investigación Cualitativa – Cuantitativa. Por lo general, el cualitativo se utiliza para descubrir y refinar preguntas de investigación. Con frecuencia se basa en métodos de recolección de datos sin medición numérica, como las descripciones y las observaciones, y el cuantitativo que utiliza la recolección y el análisis de datos para contestar preguntas de investigación y probar hipótesis establecidas previamente y confía en la medición numérica para establecer con exactitud patrones de comportamiento de una población.

3.2 POBLACION

La población en esta investigación correspondió a tres frenos de disco de los vehículos, de los cuales se escogerán aquellos que están sometidos a diferentes capacidades de transporte o carga, como serán un automóvil particular de marca Renault, una camioneta de marca Toyota y una buseta de transporte urbano de marca Mitsubishi, en donde se simulara la geometría y los efectos de su comportamiento térmico y mecánico, mediante el análisis numérico para cada uno de estos tipo de frenos y así compararlos con la bibliografía que se ha escogido para desarrollar esta investigación.

3.3 MUESTRA

Tratando del número de pruebas, se pueden realizar estudios experimentales con tratamiento estadístico y para estimar la proporción de la muestra, se tiene:

$$n = \frac{Z_C^2 * p * q}{E^2}$$

Dónde:

n = Es el tamaño de la muestra.

Z_C = Es el nivel de confianza igual al 95% el cual corresponde al 1.96.

p = Es la variabilidad positiva.

q = Es la variabilidad negativa.

E = Es la precisión o error.

$$n = \frac{(1.96)^2 * (0,5) * (0,5)}{(0,08)^2} = 12 \text{ Muestras}$$

3.4 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Se observó el comportamiento de los tres discos de los vehículos que fueron motivo de estudio para determinar las diferentes variables que influyen en ellos, mediante el análisis numérico y cálculos matemáticos además de ensayos de laboratorios de investigación.

3.5 INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Se realizaron ensayos de laboratorio, para determinar las variables que son motivo de estudio, con el fin de identificar discrepancia alguna, diferencias entre los discos y comprobar los resultados. Además, se recolectara y analizaran los datos para contestar las preguntas de investigación y probar las hipótesis establecidas previamente usando el análisis numérico establecer con exactitud patrones de comportamiento de la población.

3.6 FASES DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Fases para el desarrollo de la propuesta cumpliendo los objetivos específicos se formuló cada una de las fases y sus respectivas actividades a fin de dar solución al problema de investigación, las cuales son:

3.6.1 FASE I. Indagación del tema. En esta primera instancia del proyecto se cumplió con el objetivo específico de conocer los componentes de un disco de freno y las partes críticas de las cuales son afectadas por la corrosión, que se serán el objeto de estudio.

3.6.2 FASE II. Moldeamiento de la propuesta. En esta etapa del proyecto se identificaron los factores que rigen u orientan el proceso de frenado, realizando análisis de los discos de freno y proceder al diseño y simulación de los parámetros por los cuales estos se ven afectados por la corrosión.

3.6.3 FASE III. Presentación de la propuesta. Luego de conocer las variables que intervienen en el proyecto y obtener los datos necesarios se procedió a realizar la simulación de un disco de freno para tener una idea más clara del comportamiento de la temperatura y de los factores a los cuales está sometido en un proceso de frenado para poder tomar la decisión con que variables son las que se ven afectadas y de esta manera realizar conclusiones del comportamiento y de las propiedades específicas del material.

3.6.4 FASE IV. Socialización de la propuesta. Por último después de haber obtenido las conclusiones del proyecto se determinaron las variables por las cuales fallan los frenos de los vehículos por corrosión y las condiciones a las cuales estos se ven afectados.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 IDENTIFICACIÓN DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LA FABRICACIÓN DE LOS FRENOS DE DISCO CON EL FIN DE DETERMINAR SUS PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS.

A continuación se identificarán las propiedades más importantes de la fundición gris ya que es el material más implementado en la fabricación de frenos de disco de los vehículos.

4.1.1 Composición química de la fundición gris. Se llama fundición gris, por el aspecto de su fractura que es de color gris, ver Figura 19. Las fundiciones grises son aleaciones de Hierro – Carbono (Fe – C), que generalmente contienen el material matriz compuesto de Silicio – Azufre – Manganeso – Fósforo (Si – S – Mn – P). Las cuales son de mayor contenido en carbono que los aceros y adquieren su forma definitiva directamente por moldeo o colado, de esta manera las fundiciones grises nunca son sometidas a procesos de deformación plástica ni en frío ni en caliente. Además no son dúctiles ni maleables y no pueden forjarse ni laminarse.

Por lo general, el contenido de carbono está entre el 2,5 al 4%, siendo lo más frecuente que varíe del 2,75 al 3,5%. El contenido en silicio suele estar entre el 1 al 3,8% y el de manganeso entre el 0,5 al 1,5%. Muy raras veces los contenidos de silicio y manganeso llegan al 4 %, y en ocasiones se fabrican fundiciones especiales hasta del 15% de silicio. Los porcentajes de azufre suelen estar entre el 0,01 al 0,12%, los de fósforo entre el 0,020 al 0,10% y en algunos casos llega al 1,5%. Para conseguir ciertas características especiales como por ejemplo la dureza y su estructura molecular, se fabrican fundiciones aleadas, que además de los elementos mencionados contienen también porcentajes variables de cobre, níquel, cromo, molibdeno, etc.

Igualmente en este tipo de fundiciones grises se generan pocos espacios indeseados en el proceso de moldeo (rechupe), en donde se produce el 1% de contracción térmica aproximadamente al momento de la solidificación del material después del colado, el cual es inferior al de los aceros y fundiciones blancas. Estas pequeñas contracciones se deben a que su densidad suele estar entre el 6,95 y 7,35 g/cm³, que es menor en cuanto más porcentaje de carbono exista, de esta manera la densidad es más baja en las fundiciones blancas que están en 7,7 g/cm³ y la de los aceros en 7,87 g/cm³.

Figura 19. Aspecto de la fractura del disco.



Fuente. Autor de la investigación.

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

De tal modo que la característica más evidente de las fundiciones grises es que no presentan ledeburita (mezcla eutéctica de hierro fundido que contiene 95,7% de hierro y 4,3% de carbono), y en su estructura micrográfica aparece el grafito, que puede ser de diversos tipos, disperso en una matriz metálica similar a la de un acero.

4.1.2 Propiedades mecánicas de la fundición gris. Las propiedades más importantes para este tipo de fundición son la microestructura, la dureza y la compresión, es de interés mencionar otras características mecánicas que se tuvieron en cuenta en el desarrollo del proyecto de investigación.

El comportamiento mecánico de una fundición gris resulta parecido al de un acero debido al efecto de numerosas fisuras y grietas llamada micro-entallas, producidas por el grafito, generalmente en fundiciones no esferoidales. Por eso el alargamiento a la tracción de las fundiciones grises laminares es pequeño menor del 0,6%. De este modo la tenacidad de las fundiciones es mayor que en las fundiciones blancas, ya que las cantidades de grafito laminar resultan insuficientes.

Debido a la buena colabilidad que presentan este tipo de fundiciones, es posible moldear piezas de paredes delgadas, tales como tubos para aletas con radiadores, discos de frenos, rodetes para bombas, anillos para compresores, etc., se logran estos procesos gracias a los contenidos de la matriz metálica. Conjuntamente para que se genere una buena colabilidad, se requiere que el intervalo de solidificación sea el menor posible entre 0,5 y 1,5 horas aproximadamente, el cual está influenciado por la presencia de altos valores de carbono equivalente.

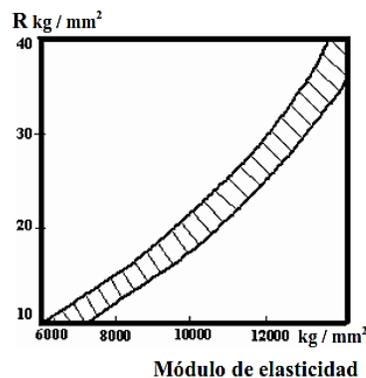
Al realizarse el ensayo de tracción de una fundición gris, se observa que el módulo de elasticidad no es constante como en los aceros, sino que disminuye a medida que aumenta la carga que actúa sobre el material. Por lo tanto, no hay como en los aceros una zona en la que exista la proporcionalidad entre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

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

En general, el módulo de elasticidad varía entre 7000 y 13000 Kg/mm² para estas fundiciones. De tal modo que al disminuir el tamaño y la cantidad de las láminas de grafito, se aumenta el módulo de elasticidad y también la resistencia a la tracción, las cuales resultan ser excelentes para este tipo de fundiciones, ver Figura 20.

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

Figura 20. Relación aproximada entre la resistencia y módulo de elasticidad de la fundición gris.

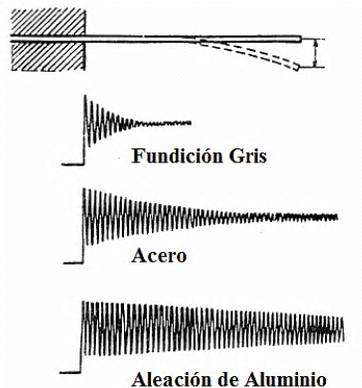


Fuente. ASHBY, Michael y Jones, Daniel. Materiales para ingeniería.

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

En la Figura 21, se representan esquemáticamente las vibraciones que se producen en las mismas condiciones diferentes materiales tales como, varillas de fundición gris, de acero y de aleación de aluminio. Se observa que las vibraciones que se amortiguan en la fundición gris son mucho más evidentes que en el acero y que en la aleación de aluminio, lo cual es muy importante en lo que respecta al emplear este tipo material en la fabricación de motores y elementos que soporten altos niveles de vibraciones.

Figura 21. Vibraciones producidas por diferentes fundiciones.



Fuente. ASHBY, Michael y Jones, Daniel. Materiales para ingeniería.

La conductividad térmica de las fundiciones grises es aproximadamente $46 \text{ W/m}^\circ\text{K}$; superior a la de los aceros. En ello influye el grafito, que es buen conductor. La capacidad para disipar calor es alta en las fundiciones grises, en cuanto mayor sea la cantidad de grafito, resulta mejor si el grafito es laminar que esferoidal. Por esta razón las lingoteras aprovechan esta propiedad y fabrican la fundición gris hipereutéctica.

Asimismo, el coeficiente de dilatación térmica es aproximadamente de $13 \mu\text{m/m}$, entre 0°C y 500°C , y de $10,5 \mu\text{m/m}$ en el rango de 0°C y 100°C . Aunque parecido al del hierro, resultan ser menores que este de $11 \mu\text{m/m}$ para el $\text{Fe } \alpha$ (alfa) y $18 \mu\text{m/m}$ para el $\text{Fe } \gamma$ (gamma). Además estas fundiciones poseen alta resistencia al choque térmico el cual resulta mejor para altos contenidos en carbono.

4.2 EVALUACIÓN DE LOS DIFERENTES ENSAYOS DE LABORATORIO REALIZADOS, MEDIANTE LA COMPARACIÓN NUMÉRICA DE LOS DATOS OBTENIDOS, A TRAVÉS DEL ANÁLISIS MATEMÁTICO Y SISTEMÁTICO.

Para la realización de estos cálculos, se tuvo en cuenta los 3 discos de los vehículos con las siguientes características:

Tabla 6. Características de los discos.

DISCO	D.1	D.2	D.3
Masa del vehículo (Kg)	1250	1950	2250
Masa del disco (Kg)	3,80	4,25	6,10

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

4.2.1 Análisis dinámico del sistema de frenos. El análisis dinámico del sistema de freno se hace a partir del cálculo de las partículas en movimiento para poder determinar condiciones de funcionamiento.

Fuerza de frenado. Las fuerzas de frenado de un vehículo son las que se desarrollan en la superficie de contacto neumático-calzada, estas fuerzas se ven limitadas por dos factores, uno es el impuesto por la adherencia a la calzada y el otro por el mismo sistema de frenos del vehículo, este último es el crítico ya que si dicha fuerza rebasa el límite de adherencia neumático-calzada se puede llegar al bloqueo de las ruedas. La fuerza de frenado total, para alcanzar una deceleración (a) es:

$$F_f = W * \left(\frac{a}{g} - f_r \right) \quad (4.1)$$

Dónde:

F_f = Fuerza de frenado. (N)

W = Peso del vehículo. (N)

a = Deceleración. (m/s²)

g = Aceleración de la gravedad. (m/s²)

f_r = Coeficiente de resistencia a la rodadura. (Adimensional)

Resistencia a la rodadura y coeficiente de resistencia a la rodadura. Se denomina resistencia a la rodadura R_r a la fuerza contraria al avance del neumático en dirección longitudinal, esta fuerza contraria es aplicada en la zona de contacto neumático-calzada, y la relación de esta fuerza con la carga W aplicada verticalmente en la superficie de la rodadura, se denomina coeficiente de resistencia a la rodadura f_r . Cuya expresión es:

$$R_r = f_r * W \quad (4.2)$$

$$f_r = 0,01 * \left(1 + \frac{V}{160} \right) \quad (4.3)$$

Dónde:

R_r = Resistencia a la rodadura. (N)

W = Peso del vehículo. (N)

f_r = Coeficiente de resistencia a la rodadura. (Adimensional)

V = Velocidad del vehículo. (m/s)

De la Ecuación 1.2, se tiene que:

Cuadro 1. Resistencia a la rodadura.

DISCO	D.1	D.2	D.3
R_r (N)	183,93	286,94	331,08

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

De la Ecuación 4.3, como la velocidad promedio para los tres vehículos es la misma, se tiene que:

$$f_r = 0,01 * \left(1 + \frac{80}{160}\right)$$

$$f_r = 0,015$$

Coefficiente de resistencia a la rodadura.

Tabla 7. Valores aproximados del coeficiente de resistencia a la rodadura de los neumaticos.

TIPO DE VEHÍCULO	SUPERFICIE		
	Hormigón o Asfalto	Dureza media	Arena
Turístico	0,015	0,08	0,30
Camiones	0,012	0,06	0,25
Tracto-camiones	0,020	0,04	0,20

Fuente. RILEY, Willian. Ingeniería Mecánica Dinámica.

El valor del coeficiente de resistencia a la rodadura se puede tomar como valor constante de 0,015 para vehículos de turismo que circulan por una superficie de hormigón o asfalto.

Por otra parte la deceleración del vehículo es:

$$a_{M\acute{a}x} = \frac{W * \mu}{\frac{W}{g}} = \mu * g \tag{4.4}$$

$$\mu = \frac{a_{M\acute{a}x}}{g} \tag{4.5}$$

Dónde:

$a_{M\acute{a}x}$ = Deceleración máxima de frenado. (m/s²)

W = Peso del vehículo. (N)

μ = Coeficiente de adherencia entre el neumático y la calzada. (Adimensional)
 g = Aceleración de la gravedad. (m/s^2)

De la Ecuación 4.4, como el coeficiente de adherencia es el mismo para los tres vehículos, se tiene que:

$$a_{M\acute{a}x} = 0,80 * 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$a_{M\acute{a}x} = 7,8480 \frac{m}{s^2}$$

Entonces la Ecuación 4.1 queda de la siguiente manera:

$$F_f = W * (\mu - f_r) \tag{4.6}$$

Coefficiente de adherencia en la calzada.

Tabla 8. Coeficientes de adherencia (μ) de neumáticos sobre calzadas en diferente estado, con distintos estados de los neumáticos y a diferentes velocidades.

VELOCIDAD DE MARCHA (Km/h)	ESTADO DE LOS NEUMATICOS	CARRETERA SECA (μ)	CARRETERA MOJADA (μ)
50	Nuevo	0,85	0,65
	Usado	1	0,50
80	Nuevo	0,80	0,60
	Usado	0,95	0,20
120	Nuevo	0,75	0,55
	Usado	0,90	0,20

Fuente. RILEY, Willian. Ingeniería Mecánica Dinámica.

De la Tabla 8, es posible determinar el coeficiente de adherencia μ , para una carretera seca con velocidad promedio de 80 Km/h en donde para un neumático nuevo, el coeficiente de adherencia será de 0,80, calculamos según la Ecuación 4.6:

$$F_f = (m * g)(\mu - f_r)$$

Cuadro 2. Coeficiente de resistencia a la rodadura.

DISCO	D.1	D.2	D.3
f_f (N)	9626,06	15016,65	17326,91

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Se puede decir que la fuerza de frenado de un sistema de frenos, de un vehículo que circula sobre una superficie seca de hormigón o asfalto, a diferentes masas y con un coeficiente de resistencia a la rodadura es de 0,015.

Fuerza de frenado en el pedal. Obtenida la fuerza de frenado, procedemos a calcular la fuerza ejercida en el pedal, teniendo en cuenta los siguientes parámetros, de forma general para todos los vehículos, el torque del pedal aumenta la fuerza ejercida sobre el pedal en 4,5 veces la fuerza inicial aplicada al pedal del freno, el servo freno aumenta 8,5 veces la fuerza que sale del torque del pedal y el cilindro maestro aumenta 5 veces la fuerza del servo freno, entonces:

$$F_{\text{Pedal}} = \frac{F_f}{F_P * F_S * F_C} \quad (4.7)$$

Dónde:

F_{Pedal} = Fuerza en el pedal. (N)

F_f = Fuerza de frenado. (N)

F_P = Fuerza del torque en el pedal. (N)

F_S = Fuerza producida por el servofreno. (N)

F_C = Fuerza en el cilindro maestro. (N)

Una vez conocidos los valores se procede a calcular la fuerza en el pedal, el cual va a ser la fuerza que el conductor aplique para detener el vehículo:

Cuadro 3. Fuerza en el pedal.

DISCO	D.1	D.2	D.3
F_{Pedal} (N)	50,33	78,51	90,59

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Tiempo de frenado. Es el tiempo que tarda el vehículo en decelerar entre dos velocidades al actuar sobre los frenos es:

$$t_{V_1-V_2} = m * \gamma_F * \frac{1}{F_f + (m * g * \text{Sen } \theta) + (m * g * F_r)} * (V_1 - V_2) \quad (4.8)$$

Dónde:

$t_{V_1-V_2}$ = Tiempo de frenado. (s)

m = Masa del vehiculo. (Kg)

g = Aceleración de la gravedad. (m/s²)

γ_F = Coeficiente de masas rotativas que es igual a 1,05. (Adimensional)

F_f = Fuerza de frenado. (N)

f_r = Coeficiente de resistencia a la rodadura. (Adimensional)

θ = Ángulo de descenso. (Grados)

V_1 = Velocidad inicial en el frenado. (m/s)

V_2 = Velocidad final en el frenado. (m/s)

En donde la expresión $m * g * \text{Sen } \theta = R_g$ es la resistencia gravitatoria, θ es el ángulo de descenso en este caso el ángulo es negativo y R_g también, por lo que dicha resistencia se vuelve una fuerza propulsora, en caso de ascenso el ángulo es positivo y R_g también lo es, aquí esta resistencia se opone al movimiento y es una fuerza opositora.³³

De la Ecuación 4.8, se calcula en la Tabla 9 el tiempo de frenada entre dos velocidades, en función de la pendiente y de la velocidad:

Tabla 9. Tiempo de frenado en función de la velocidad y el ángulo de descenso para el vehículo.

INTERVALO DE VELOCIDAD (Km/h)		ΔV (Km/h)	(m/s)	ÁNGULO DE DESCENSO				
				$\theta=0^\circ$	$\theta=5^\circ$	$\theta=10^\circ$	$\theta=15^\circ$	$\theta=20^\circ$
V_1	V_2			TIEMPO				
				t (s)	t (s)	t (s)	t (s)	t (s)
80	75	5	1,38	0,18	0,16	0,15	0,13	0,12
80	70	10	2,77	0,37	0,33	0,30	0,28	0,26
80	60	20	5,55	0,74	0,67	0,61	0,56	0,52
80	50	30	8,33	1,11	1,00	0,91	0,84	0,78
80	40	40	11,11	1,48	1,34	1,22	1,12	1,04
80	30	50	13,88	1,85	1,67	1,52	1,40	1,30
80	20	60	16,66	2,22	2,01	1,83	1,68	1,56
80	10	70	19,44	2,60	2,34	2,13	1,96	1,82
80	0	80	22,22	2,97	2,68	2,44	2,24	2,08

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Para el caso de los tres discos el tiempo de frenado es aproximadamente el mismo ya que el intervalo de velocidad es igual y por la función que expresa el tiempo de detención del vehículo.

Se puede apreciar que los tiempos de frenada aumentan con la velocidad y disminuye con el ángulo de descenso, aquí no se considera el tiempo de reacción del conductor t_{RC} , que es

³³ **IZQUIERDO, Francisco. A.** Teoría de los vehículos automóviles. Segunda Edición. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid. 2011. 122-161 p.

el tiempo que surge desde que existe una circunstancia imprevista hasta que el conductor actúa sobre el pedal del freno, el valor varía entre 0,5 y 2 segundos. Además no se considera el tiempo de reacción del sistema t_{RS} , que es el tiempo que transcurre desde que se actúa sobre el pedal del freno hasta que se consiga la fuerza requerida, este es un valor aproximado de 3 segundos. Por otra parte no se toma en consideración las acciones aerodinámicas, ya que la resistencia aerodinámica hace efecto en el vehículo a partir de más de 90Km/h.

Deceleración de frenado. De forma general la deceleración necesaria para detener un vehículo a cierta velocidad sin considerar los efectos aerodinámicos esta expresada por:

$$a = \frac{F_f + (m * g * \text{Sen } \theta) + (m * g * f_r)}{m} \quad (4.9)$$

Dónde:

a = Deceleración de frenado. (m/s^2)

m = Masa del vehiculo. (Kg)

g = Aceleración de la gravedad. (m/s^2)

γ_F = Coeficiente de masas rotativas que es igual a 1,05.

F_f = Fuerza de frenado. (N)

f_r = Coeficiente de resistencia a la rodadura. (Adimensional)

θ = Ángulo de descenso. (Grados)

A continuación, se presenta la Tabla 10 de deceleraciones en cada frenada y no se tienen en cuenta las acciones aerodinámicas.

Tabla 10. Variación de la deceleración de un vehículo dependiente del ángulo de descenso para el vehículo.

ÁNGULO DE DECELERACIÓN	$\theta=0^\circ$	$\theta=5^\circ$	$\theta=10^\circ$	$\theta=15^\circ$	$\theta=20^\circ$
a (m/s^2)	7,84	8,70	9,55	10,38	11,20

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

La deceleración es constante para los tres discos respecto a la velocidad para cada ángulo de descenso. Se observa que la deceleración de frenado del vehículo a medida que aumenta el ángulo de descenso las deceleraciones aumentan ya que la resistencia gravitacional va aumentando que para este caso también es una fuerza propulsora.

Distancia de frenado. Para calcular la distancia de frenado se toma la siguiente Ecuación:

$$L_{V_1-V_2} = \frac{W * \gamma_F}{2 * g * C} * \text{Ln} \left[\frac{F_f + W * \text{Sen } \theta + W * f_r + C * V_1^2}{F_f + W * \text{Sen } \theta + W * f_r + C * V_2^2} \right] \quad (4.10)$$

Dónde:

$L_{V_1-V_2}$ = Distancia total de frenado recorrida entre dos velocidades. (m)

W = Peso del vehiculo. (N)

g = Aceleración de la gravedad. (m/s^2)

γ_F = Coeficiente de masas rotativas que es igual a 1,05. (Adimensional)

F_f = Fuerza de frenado. (N)

f_r = Coeficiente de resistencia a la rodadura. (Adimensional)

θ = Ángulo de descenso. (Grados)

V_1 = Velocidad inicial en el frenado. (m/s)

V_2 = Velocidad final en el frenado. (m/s)

C = Constante aerodinámica que es igual a 1.

A continuación se presenta la Tabla 11 de la distancia de frenado para distintas velocidades y ángulos de descenso.

Tabla 11. Distancias de frenado a distintas velocidades y ángulos de descenso para el vehículo.

INTERVALO DE VELOCIDAD (m/s)		ÁNGULO DE DESCENSO				
		$\theta=0^\circ$	$\theta=5^\circ$	$\theta=10^\circ$	$\theta=15^\circ$	$\theta=20^\circ$
		LONGITUD				
V_1	V_2	L (m)	L (m)	L (m)	L (m)	L (m)
22,22	19,44	7,42	6,72	6,14	5,66	5,26
22,22	16,66	13,89	12,58	11,49	10,59	9,84
22,22	13,88	19,44	17,59	16,07	14,81	13,76
22,22	11,11	24,02	21,72	19,84	18,28	16,98
22,22	8,33	27,60	24,96	22,79	20,99	19,49
22,22	5,55	30,16	27,27	24,89	22,93	21,29
22,22	2,77	31,71	28,66	26,17	24,10	22,38
22,22	1,38	32,10	29,01	26,49	24,39	22,65
22,22	0	32,23	29,13	26,59	24,49	22,74

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Cuando se requiere evaluar la distancia hasta detener el vehículo ($V_2 = 0$), se utiliza la siguiente Ecuación:

$$L_{V_1-V_2} = \frac{W * \gamma_F}{2 * g * C} * \ln \left[1 + \frac{C * V_1^2}{\eta_f * \mu * W + W * \text{Sen } \theta + W * f_r} \right] \quad (4.11)$$

Dónde:

$L_{V_1-V_2}$ = Distancia total de frenado recorrida entre dos velocidades. (m)

W = Peso del vehiculo. (N)

μ = Coeficiente de adherencia entre el neumático y la calzada. (Adimensional)

g = Aceleración de la gravedad. (m/s^2)

γ_F = Coeficiente de masas rotativas que es igual a 1,05.

F_f = Fuerza de frenado. (N)

f_r = Coeficiente de resistencia a la rodadura. (Adimensional)

η_f = Rendimiento de frenado. (Adimensional)

θ = Ángulo de descenso. (Grados)

V_1 = Velocidad inicial en el frenado. (m/s)

V_2 = Velocidad final en el frenado. (m/s)

C = Constante aerodinámica que es igual a 1.

El rendimiento del frenado se calcula mediante la siguiente Ecuación:

$$\eta_f = \frac{a_{M\acute{a}x}}{\mu_{M\acute{a}x} * g} \quad (1.12)$$

Dónde:

η_f = Rendimiento de frenado. (Adimensional)

$a_{M\acute{a}x}$ = Deceleración máxima de frenado. (m/s^2)

$\mu_{M\acute{a}x}$ = Coeficiente de adherencia máximo entre el neumático y la calzada.

g = Aceleración de la gravedad. (m/s^2)

De la Ecuación 4.12, se tiene:

$$\eta_f = \frac{7,84 \frac{m}{s^2}}{0,80 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 1$$

A continuación se presenta la Tabla 12 de la distancia de frenado para distintas velocidades hasta la detención del vehículo y ángulos de descenso.

Tabla 12. Distancias de frenado a distintas velocidades hasta la detención del vehículo y ángulos de descenso para el vehículo.

INTERVALO DE VELOCIDAD (m/s)		ÁNGULO DE DESCENSO				
		$\theta=0^\circ$	$\theta=5^\circ$	$\theta=10^\circ$	$\theta=15^\circ$	$\theta=20^\circ$
V_1	V_2	LONGITUD				
		L (m)	L (m)	L (m)	L (m)	L (m)
1,38	0	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08
2,77	0	0,50	0,45	0,41	0,38	0,35
5,55	0	2,02	1,82	1,66	1,53	1,42
8,33	0	4,54	4,10	3,74	3,45	3,20
11,11	0	8,05	7,28	6,64	6,12	5,68
13,88	0	12,54	11,34	10,35	9,54	8,86
16,66	0	17,99	16,27	14,86	13,69	12,72
19,44	0	24,36	22,05	20,15	18,57	17,25
22,22	0	32,15	29,05	26,20	24,16	22,45

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Las distancias de frenado para los tres discos varían en cuestión de milésimas de segundos, y se hará un promedio de las tres distancias entre los discos para cuestión de cálculos.

Se puede observar en las Tablas 11 y 12, que la distancia de frenado cada vez va disminuyendo a medida que se aumenta también el ángulo de inclinación o descenso de la calzada, así como la propia velocidad del vehículo, lo que era de suponerse ya que la energía cinética cada vez mayor así como la resistencia gravitacional que impulsa al vehículo, la distancia de frenado también se ve involucrada con las características aerodinámicas, como son el área frontal y el coeficiente de resistencia aerodinámica, podemos darnos cuenta que el factor C se incluye en la función logarítmica para cada caso, de este modo mientras más grande sea el área frontal del vehículo mayor será el coeficiente C y de esta manera se tendrá menos distancia de frenado.

Velocidad periférica. La siguiente Ecuación establece la relación que hay entre la velocidad lineal del vehículo y la velocidad periférica del neumático, debe existir esta diferencia ya que de esta manera se produce la frenada de los vehículos.

$$X = \frac{(V_1 - V_P)}{V_P} * 100 \quad (4.13)$$

Dónde:

X = Porcentaje de adherencia. (%)

V_1 = Velocidad inicial. (m/s)

V_P = Velocidad Periférica. (m/s)

Se supone una adherencia del 80%, por tanto despejando la velocidad Periférica V_P de la Ecuación 4.13 se obtiene:

$$V_P = \frac{V_1 * 100}{(100 + X)}$$

$$V_P = \frac{\left(22,22 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) * 100}{(100 + 80)}$$

$$V_P = 12,34 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

La velocidad periférica es igual para los tres discos debido a que la velocidad inicial es de 80 Km/h para cada uno.

4.2.2 Análisis de Transferencia de calor en el sistema de frenos. La cantidad de transferencia de calor que experimenta un sistema de un estado a otro se llama termodinámica. La transferencia de calor se interesa por saber la velocidad con la que se da esta transmisión.³⁴

Mecanismos de transferencia de calor. La transferencia de energía que se manifiesta como calor se produce desde un medio de temperatura más elevada hacia otro con temperatura más baja, y dicha transferencia cesa cuando los dos medios igualan su temperatura. Existen tres maneras de transferir el calor: conducción, convección y radiación, siempre que haya una diferencia de temperatura entre dos cuerpos o medios, a continuación se describe cada uno de ellos.

Conducción: La conducción se da en los sólidos, líquidos o gases, y no es más que la transmisión de energía de las partículas más energéticas hacia las menos energéticas siempre y cuando se encuentren juntas.

Convección: Es la transmisión de energía entre un sólido y el líquido o gas que estén adyacentes y en movimiento. Esta se relaciona con el movimiento de fluidos y la conducción. La transferencia de calor será más rápida mientras el fluido se mueva más rápido, si el fluido no se mueve existirá conducción pura.

Radiación: La radiación se presenta en forma de ondas electromagnéticas o fotones debido a los cambios eléctricos de los átomos o moléculas de un cuerpo. La transmisión de energía por radiación se da a velocidad de la luz a diferencia de la conducción y convección la radiación no requiere de un medio interpuesto para transmitir energía.

³⁴ CENGEL, Yunus. A. Transferencia de Calor, segunda edición. Bogotá, Colombia: McGraw Hill. 2004. 334-387 p.

Análisis térmico del sistema de frenos.

Para el análisis térmico es necesario un punto de partida, lo cual nos lleva a determinar la energía y potencia disipada en el proceso de frenado como primer paso. Con el objeto de estar del lado de la seguridad, es necesario considerar que el sistema de frenos, además de detener el vehículo, a de frenar las inercias de las masas en rotación.

Energía disipada por el disco de freno. Para llevar a cabo este cálculo, se supondrán una serie de datos con el fin de poder llegar a determinar una temperatura y una presión ejercida sobre el disco de freno.

Velocidad inicial (V_i): 80 km/h = 22,22 m/s .
Coeficiente de masas rotativas: $\gamma_F = 1,05$.

El primer paso fue determinar la energía a disipar por medio de los frenos, ésta equivale a la energía cinética que poseen los automóviles al encontrarse en movimiento. Utilizando la Ecuación 1.13, es posible determinar la energía a disipar en el frenado del vehículo:

$$E_f = \frac{\gamma_F * m * (V_i^2 - V_f^2)}{2} \quad (4.14)$$

Dónde:

E_f = Energía a disipar por el sistema de frenos. (Joules)

γ_F = Coeficiente de masas rotativas. (Adimensional)

m = Masa del vehículo. (Kg)

V_i = Velocidad inicial del vehículo. (m/s)

V_f = Velocidad final del vehículo. (m/s)

De la Ecuación 4.13 se calcula la energía de frenado:

Cuadro 4. Energía disipada por el sistema de frenos.

DISCO	D.1	D.2	D.3
E_f (J)	324073,42	505554,54	583332,16

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

El resultado representa la energía total que se debe disipar por el sistema de freno y corresponde a la energía cinética que lleva el vehículo a una velocidad de 80 km/h.

Como en el vehículo se distribuye la masa en los ejes, delantero y trasero, el reparto del frenado para el vehículo en el eje delantero es del 70% y 30% en el eje trasero. Lo que

supone que el eje delantero tiene una mayor absorción de energía, entonces tendremos la siguiente Ecuación:

$$E_{\text{Eje delantero}} = E_f * 0.7 \quad (4.15)$$

Cuadro 5. Energía en el eje delantero.

DISCO	D.1	D.2	D.3
E_{Eje delantero} (J)	226851,39	353888,18	408332,51

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Y como el eje delantero está comprendido por dos discos, la energía se dividirá para los dos:

$$E_{\text{Disco}} = \frac{E_{\text{Eje delantero}}}{2} \quad (4.16)$$

Cuadro 6. Energía en el disco.

DISCO	D.1	D.2	D.3
E_{Disco} (J)	113425,69	176944,09	204166,25

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Además se sabe que el disco absorbe aproximadamente un 90% de la energía en una rueda delantera y la pastilla un 10%, esta relación se toma en base a las masas de estos dos elementos, entonces la energía es:

$$E_{\text{Total en Disco}} = E_{\text{Disco}} * 0.9 \quad (4.17)$$

Cuadro 7. Energía total en el disco.

DISCO	D.1	D.2	D.3
E_{Total en Disco} (J)	102083,12	159249,68	183749,63

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Procedemos a calcular la energía en la pastilla del freno:

$$E_{\text{Pastilla}} = E_{\text{Disco}} * 0.1$$

Cuadro 8. Energía en la pastilla.

DISCO	D.1	D.2	D.3
E_{Pastilla} (J)	11342,57	17694,41	20416,62

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Esta es la energía total que disipa un disco de freno para detener un vehículo a diferentes masas y que circula a una velocidad 80 Km/h.

Potencia disipada por el sistema de frenos. Para este cálculo se considera que el motor no actúa como freno, entonces se aumenta el coeficiente de seguridad. Por regla general, ante cualquier tipo de emergencia en la vía, para realizar una frenada en seco se debe actuar no solamente sobre el freno, sino también sobre el embrague ya que de esta manera se desarticulan las masas rotativas del sistema de transmisión del vehículo. La potencia disipada tiene la siguiente expresión:

$$H = [(\gamma_F * m * a) + (m * g * \text{Sen } \theta)] * V \quad (4.18)$$

Dónde:

H = Potencia disipada por el sistema de freno. (Watts)

γ_F = Coeficiente de masas rotativas. (Adimensional)

m = Masa del vehiculo. (Kg)

g = Aceleración de la gravedad. (m/s²)

θ = Ángulo de descenso. (Grados)

V = Velocidad del vehículo. (m/s)

a = Deceleración de frenado. (m/s²)

A continuación se presenta la Tabla 13 de la potencia disipada en el proceso de frenado en función de la deceleración y la velocidad.

Tabla 13. Variación de la potencia en función de la velocidad y el ángulo de descenso para el vehículo.

INTERVALO DE VELOCIDAD (Km/h)		ΔV (Km/h)	(m/s)	PENDIENTE				
				$\theta=0^\circ$	$\theta=5^\circ$	$\theta=10^\circ$	$\theta=15^\circ$	$\theta=20^\circ$
				a=7,84 m/s ²	a=8,70 m/s ²	a=9,55 m/s ²	a=10,3 m/s ²	a=11,20 m/s ²
				POTENCIA DISIPADA				
V ₁	V ₂			H(Watts)	H(Watts)	H(Watts)	H(Watts)	H(Watts)
80	75	5	1,38	14306,36	17349,17	20369,01	23342,83	26247,74
80	70	10	2,77	28613,75	34699,59	40739,49	46687,34	52497,37
80	60	20	5,55	57225,45	69396,68	81476,05	93371,33	104990,96
80	50	30	8,33	85837,15	104093,77	122212,62	140055,32	157484,55
80	40	40	11,11	114449,88	138792,12	162950,65	186740,99	209980,03
80	30	50	13,88	143062,61	173490,46	203866,68	233426,65	262475,51
80	20	60	16,66	171675,34	208188,80	244426,71	280112,32	314970,99
80	10	70	19,44	200287,04	242885,90	285163,27	326796,31	367464,58
80	0	80	22,22	228899,77	277584,24	325901,30	373481,98	419960,06

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Se calculó una potencia promedio ya que la potencia variaba muy poco para los tres discos de los vehículos. De la tabla 13 se puede deducir que a velocidad constante la potencia disipada al ambiente aumenta al aumentar el ángulo de descenso, esto se debe a que la potencia es proporcional a la deceleración, por ende a más pendiente la deceleración es mayor.

Análisis térmico en los discos.

La potencia disipada en el sistema de frenos que proviene de la energía cinética y potencial del vehículo, se transforma en energía calorífica, que va a ser generada en un corto intervalo de tiempo. Para que el sistema de frenos funcione correctamente, el calor generado debe ser evacuado con mayor rapidez posible, para que las sucesivas frenadas no produzcan una elevada temperatura y así perder la seguridad del sistema, el propio avance del vehículo permite la disipación del calor generado esencialmente por convección y radiación. Cuando se producen frenadas excesivas, la temperatura se eleva hasta llegar a un límite (temperatura de saturación), en función de la capacidad de disipación térmica del disco de freno.³⁵

³⁵ **INCROPERA, Frank.** Fundamentos de transferencia de calor cuarta edición. México: Pearson. 1999. 284-351 p.

En caso de llegar a la temperatura de saturación, disminuirá el coeficiente de fricción entre los elementos del freno y aparecerá el fenómeno que se estudiara más adelante llamado Fading. Las propiedades físicas y térmicas de la fundición gris nodular de grafito laminar el cual tiene una composición de silicio y manganeso, fueron obtenidas de la Tabla A-3 del libro de transferencia de calor de Yunus A. Cengel, presente en el ANEXO A:

Conductividad térmica: $k = 41 \text{ J/s} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C}$

Calor específico: $C_p = 434 \text{ J/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$

Densidad: $\rho = 8131 \text{ Kg/m}^3$

Difusividad térmica: $\alpha = 11,60 \cdot 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$

Coefficiente de transmisión térmica: $U = 32 \text{ J/s} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

La elevación de temperatura del conjunto de un freno se evalúa aproximadamente por la siguiente expresión:

$$\Delta T = \frac{E_{\text{Total en Disco}}}{m \cdot C_p} \quad (4.19)$$

Dónde:

ΔT = Diferencia de temperatura entre el disco y el medio ambiente. ($^\circ\text{C}$)

$E_{\text{Total en Disco}}$ = Energía cinética absorbida por el disco. (J)

m = Masa del disco de freno. (Kg)

C_p = Calor específico del material del disco.

La Ecuación 4.19, se utiliza para explicar lo que sucede cuando un freno está funcionando. Sin embargo, en la práctica intervienen más variables y por tal razón será poco probable que tal análisis se aproxime a los resultados experimentales.

Con los valores ya conocidos calculamos la diferencia de temperatura con la Ecuación 4.19:

Cuadro 9. Diferencia de temperatura entre el disco y el medio ambiente.

DISCO	D.1	D.2	D.3
ΔT ($^\circ\text{C}$)	62	87	70

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Para la calcular la temperatura en la superficie del disco utilizamos la siguiente Ecuación:

$$T_1 - T_\infty = \Delta T \quad (4.20)$$

Donde T_∞ es la temperatura ambiente de 20°C , entonces de la Ecuación 4.20 se calcula la temperatura que alcanzo la superficie del disco de freno y es:

Cuadro 10. Temperatura en la superficie del disco.

DISCO	D.1	D.2	D.3
T ₁ (°C)	82	107	90

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Lo que nos indica que un vehículo con una masa de 1250, 1950 y 2250 Kg y que llevan una velocidad de 80 Km/h, circulando en un ambiente de 20°C, la temperatura que se genera en el disco de freno hasta detenerse es de aproximadamente 82, 107 y 90 °C respectivamente.

Enfriamiento de Newton. Un objeto sometido a una temperatura T₁, se enfriara si se deja a temperatura ambiente T_∞ de acuerdo con la Ecuación exponencial:

$$T_i - T_{\infty} = (T_1 - T_{\infty}) * e^{-\frac{A*U}{m*C_p}*t} \quad (4.21)$$

Dónde:

T_i = Temperatura instantánea en cada momento. (°C)

T_∞ = Temperatura ambiente. (°C)

A = Área de transferencia de calor. (m²)

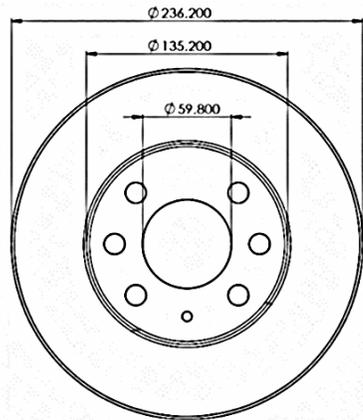
U = Coeficiente de transmisión térmica superficial del material. (J/s * m² * °C)

m = Masa del disco de freno. (Kg)

C_p = Calos específico del material. (J/Kg * °C)

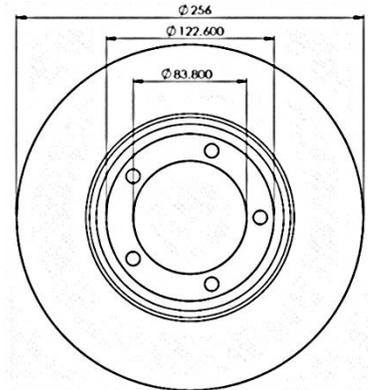
t = Tiempo de enfriamiento de Newton. (s)

Figura 22. Diámetros interior y exterior del disco 1.



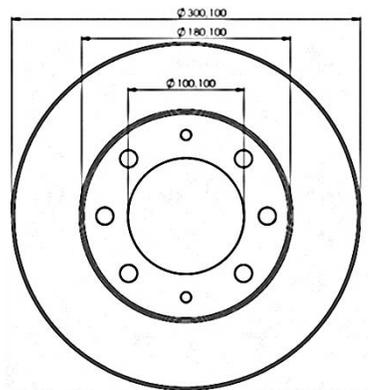
Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Figura 23. Diámetros interior y exterior del disco 2.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Figura 24. Diámetros interior y exterior del disco 3.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Como el disco de freno hace contacto con las pastillas mediante dos superficies, el área de la superficie de contacto aproximada tiene la siguiente Ecuación:

$$A_{\text{Disco}} = 2 * \pi * (r_{\text{Exterior}}^2 - r_{\text{Interior}}^2) \quad (4.22)$$

Tabla 14. Diámetros y áreas de los discos.

DISCO	D.1	D.2	D.3
Diámetro mayor (m)	0,23	0,25	0,30
Diámetro menor (m)	0,13	0,12	0,18
A_{Disco} (m ²)	0,05	0,07	0,09

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

A continuación se presenta la Tabla 15 del enfriamiento de Newton, despejando la temperatura instantánea de la Ecuación 4.21:

$$T_i = (T_1 - T_\infty) * e^{-\frac{A*U}{m*c_P}*t} + T_\infty$$

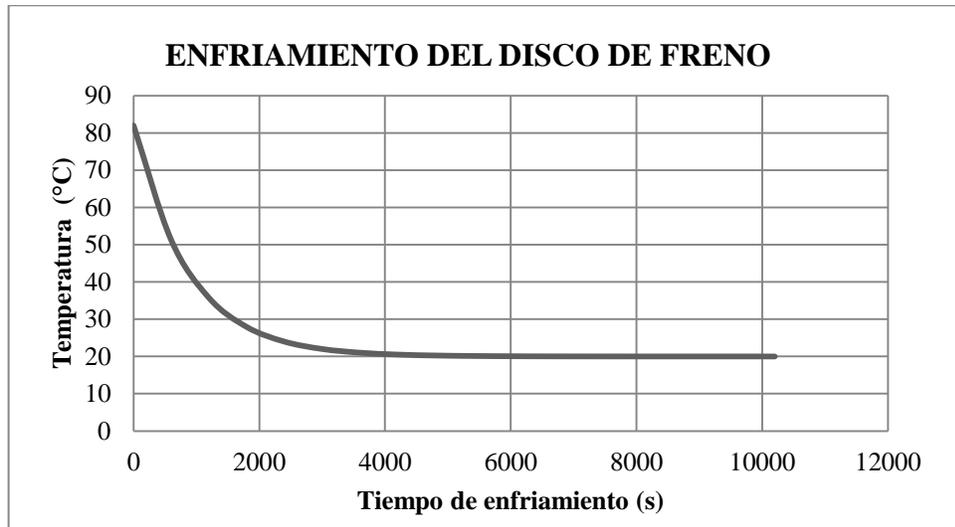
Tabla 15. Variación de la temperatura en función del tiempo del enfriamiento de Newton para los discos.

DISCO	Disco 1	Disco 2	Disco 3
t (s)	T_i (°C)	T_i (°C)	T_i (°C)
0	82	107	90
600	51,2312	58,1089	56,3124
1200	35,7321	36,6929	38,8367
1800	27,9247	27,3120	29,7715
2400	23,9919	23,2029	25,0689
3000	22,0108	21,4029	22,6294
3600	21,0129	20,6145	21,3640
4200	20,5102	20,2691	20,7075
4800	20,2570	20,1179	20,3670
5400	20,1294	20,0516	20,1904
6000	20,0652	20,0226	20,0987
6600	20,0328	20,0099	20,0512
7200	20,0165	20,0043	20,0265
7800	20,0083	20,0019	20,0137
8400	20,0042	20,0008	20,0071
9000	20,0021	20,0005	20,0037
9600	20,0010	20,0003	20,0019
10200	20,0001	20,0001	20,0009
10800	20,0000	20,0000	20,0004
11400	20,0000	20,0000	20,0001

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

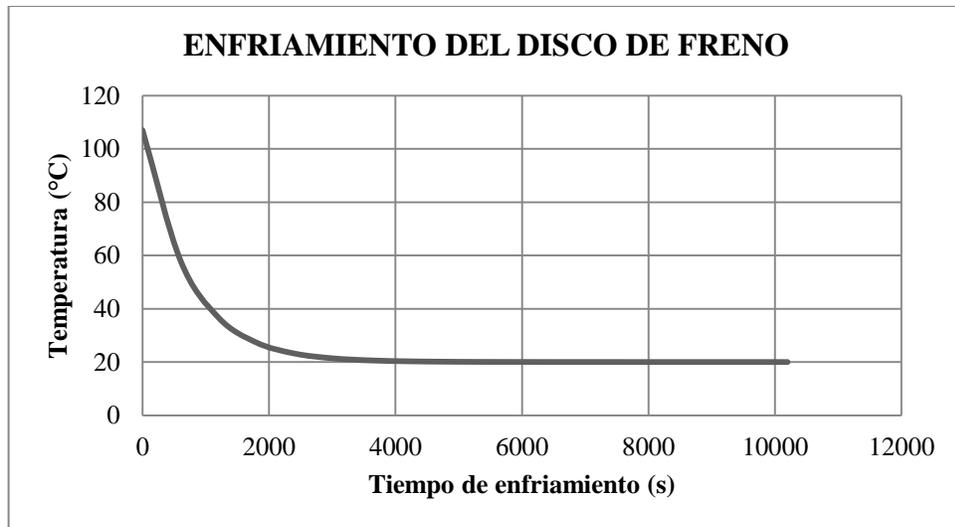
A continuación se presentan las Gráficas 3, 4 y 5, del enfriamiento de Newton con la variación del tiempo.

Grafica 3. Gráfica del enfriamiento de Newton para el disco de freno 1, a temperatura ambiente.



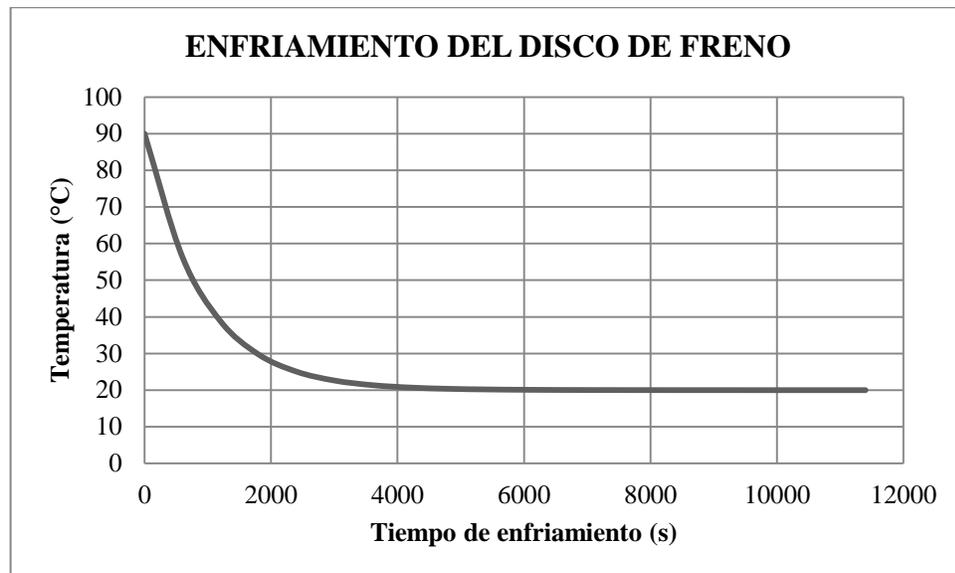
Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Grafica 4. Gráfica del enfriamiento de Newton para el disco de freno 2, a temperatura ambiente.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Grafica 5. Gráfica del enfriamiento de Newton para el disco de freno 3, a temperatura ambiente.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Los discos de freno luego de haber sido sometidos a unas temperaturas de 82, 107 y 90°C respectivamente, en una frenada, estos discos tomarán una temperatura ambiente de 20°C en aproximadamente de entre 40 a 60 minutos, siempre y cuando el enfriamiento se dé por convección natural, es decir que el aire en el ambiente deber tener una velocidad igual a cero.

Tipos de convección que afectan al disco.

Los discos de freno están sometidos a dos tipos de movimiento, el primero es el producido por el motor y transmitido por los ejes hasta la rueda y el segundo que es el movimiento de traslación que el vehículo lleva al desplazarse.

Convección frontal en el disco. Este tipo de convección afecta la periferia del disco de freno. El flujo de aire sobre un cilindro exhibe patrones complejos, el fluido que se aproxima al cilindro se ramifica y lo rodea, formando una capa limite que lo envuelve. Las partículas de fluido sobre el plano medio chocan contra el cilindro en el punto de estancamiento y la consecuencia de esto es la elevación de presión en ese punto.

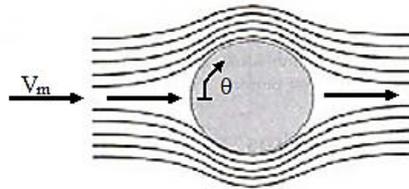
Para $Re \leq 1$, se tiene un flujo deslizante y el coeficiente de resistencia disminuye al aumentar el número de Reynolds.

Para $Re = 10$, se empieza a presentar una separación de la parte posterior del cuerpo hasta $Re \approx 90$.

Para $Re = 10^3$, la región de separación aumenta y la resistencia al movimiento se debe principalmente a la resistencia por la presión.

Para $10^3 < Re < 10^5$, el coeficiente de resistencia permanece más o menos constante. La separación del flujo ocurre alrededor de $\theta = 80^\circ$

Figura 25. Flujo al rededor del cilindro.

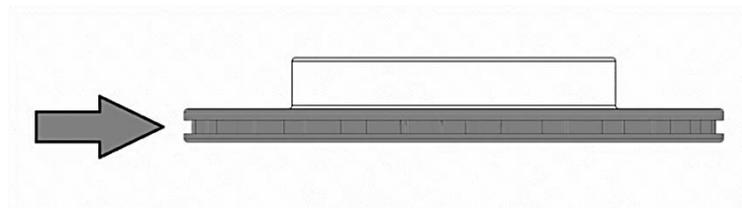


Fuente. INCROPERA, Frank. Fundamentos de transferencia de calor.

Para el desarrollo de este tipo de transferencia de calor se utilizaron los datos del vehículo que está a una velocidad de 80 Km/h, una temperatura ambiente de 20°C y una temperatura superficial de los discos de 82, 107 y 90°C respectivamente, aproximadamente obtenida en el cálculo de la temperatura superficial al momento del frenado.

Convección periférica. Para los cálculos de convección periférica se realizara con los valores de las propiedades del aire a una temperatura promedio entre el ambiente y la superficie de fricción del disco en este caso la temperatura de película.

Figura 26. Convección periférica del disco de freno.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

$$T_f = \frac{T_S + T_\infty}{2} \quad (4.23)$$

Dónde:

T_f = Temperatura periférica. (°C)

T_S = Temperatura de la superficie del disco. (°C)

T_∞ = Temperatura del aire. (°C)

Teniendo en cuenta las temperaturas de la superficie de los discos y la del ambiente que es 20°C para los tres discos, se tiene:

Cuadro 11. Temperatura periférica en los discos.

DISCO	D.1	D.2	D.3
T _f (°C)	51	63,50	55

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Con las temperaturas periféricas de cada disco se encontraron las propiedades del aire en la Tabla A-15 del libro de transferencia de calor Yunus A. Cengel, presente en el ANEXO B.

Tabla 16. Propiedades del aire a diferentes temperaturas.

DISCO	D.1	D.2	D.3
Numero de Prandtl Pr	0,7225	0,7193	0,7215
Viscosidad cinemática ν (m ² /s)	1,8078 * 10 ⁻⁵	1,9306 * 10 ⁻⁵	1,8470 * 10 ⁻⁵
Conductividad térmica k (W/m * °C)	0,02742	0,02833	0,02771

Fuente. CENGEL, Yunus. A. Transferencia de Calor.

Se calculó el número de Reynolds de acuerdo a la Ecuación para diámetros externos de discos, quedando de esta manera:

$$Re = \frac{V_m * D}{\nu} \quad (4.24)$$

Dónde:

Re = Número de Reynolds. (Adimensional)

V_m = Velocidad media del aire. (m/s)

D = Diámetro del disco de freno. (m)

ν = Viscosidad cinemática del aire. (m²/s)

Teniendo en cuenta que la velocidad del vehículo es 80Km/h esta equivale a 22,22 m/s, y con los diámetros de los discos de freno, entonces se tiene:

Cuadro 12. Número de Reynolds para convección periférica.

DISCO	D.1	D.2	D.3
Re	290343,86	294669,18	361065,63

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Según la Tabla 7-1 de las correlaciones empíricas de Nusselt del libro de transferencia de calor de Yunus A. Cengel, presente en el ANEXO C, como el número de Reynolds se encuentra entre el rango de 40000-400000, el Nusselt es:

$$Nu = 0,027 * Re^{0,805} * Pr^{\frac{1}{3}} \quad (4.25)$$

Dónde:

Nu = Número de Nusselt. (Adimensional)
 Re = Número de Reynolds. (Adimensional)
 Pr = Número de Prandtl. (Adimensional)

Entonces, se tiene:

Cuadro 13. Número de Nusselt para convección periférica.

DISCO	D.1	D.2	D.3
Nu	605,27	611,61	721,05

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Con este valor del Nusselt podemos encontrar el coeficiente de convección aplicando la siguiente Ecuación:

$$h = \frac{k}{D} * Nu \quad (4.26)$$

Dónde:

h = Coeficiente de convección. (W/m² * °C)
 k = Conductividad térmica. (W/m * °C)
 D = Diámetro del disco de freno. (m)

Entonces, se tiene:

Cuadro 14. Coeficiente de convección periférica.

DISCO	D.1	D.2	D.3
h (W/m² * °C)	70,26	67,68	66,57

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

A continuación se calculó el área superficial de la periferia del disco, la cual es:

$$A_S = P * e = \pi * D * e \quad (4.27)$$

Dónde:

A_S = Área superficial del disco de freno. (m²)

P = Perímetro del disco de freno. (m)

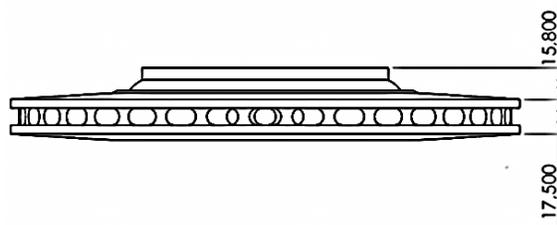
e = Espesor del disco de freno. (m)

Figura 27. Espesores del disco de freno 1. (mm)



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Figura 28. Espesores del disco de freno 2. (mm)



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Figura 29. Espesores del disco de freno 3. (mm)



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Entonces, se tiene:

Cuadro 15. Área superficial de la periferia del disco de freno.

DISCO	D.1	D.2	D.3
A_S (m ²)	0,0114	0,0140	0,0171

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Con estos valores encontramos la velocidad de pérdida de calor de la periferia del disco de freno hacia el ambiente.

$$\dot{Q} = h * A_S * \Delta T \quad (4.28)$$

$$\dot{Q} = h * A_S * (T_S - T_{\infty}) \quad (4.29)$$

Entonces, se tiene:

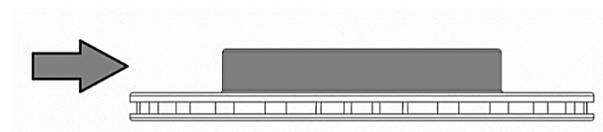
Cuadro 16. Velocidad de pérdida de calor periférica.

DISCO	D.1	D.2	D.3
\dot{Q}_P (W)	49,75	82,43	79,92

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Convección en la campana. Para este cálculo se tomaron todos los datos anteriores, del cálculo de convección en la periferia, solamente variarían los diámetros y los espesores que serán los de la campana del disco.

Figura 30. Convección en la campana del disco de freno.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Entonces procedemos a reemplazar los valores en la Ecuación 4.24:

$$Re = \frac{V_m * D}{\nu}$$

Cuadro 17. Número de Reynolds para convección en la campana.

DISCO	D.1	D.2	D.3
Re	166193,24	141118,91	216687,50

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

De igual manera en la Tabla 7-1 de las correlaciones empíricas de Nusselt del libro de transferencia de calor Yunus A. Cengel, presente en el ANEXO C, como el número de Reynolds se encuentra entre el rango de 40000-400000, el Nusselt según la Ecuación 4.25:

$$Nu = 0,027 * Re^{0,805} * Pr^{\frac{1}{3}}$$

Cuadro 18. Número de Nusselt para convección en la campana.

DISCO	D.1	D.2	D.3
Nu	386,28	338,12	478,03

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Con este valor de Nusselt podemos encontrar el coeficiente de convección aplicando la Ecuación 4.26:

$$h = \frac{k}{D} * Nu$$

Cuadro 19. Coeficiente de convección en la campana.

DISCO	D.1	D.2	D.3
h (W/m² * °C)	78,3419	78,13	73,54

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

A continuación encontraremos el área superficial de la periferia del disco con la Ecuación 4.27:

$$A_S = P * e = \pi * D * e$$

Cuadro 20. Área superficial del disco en la campana.

DISCO	D.1	D.2	D.3
A_S (m²)	0,009514	0,006085	0,01601

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Con estos valores ahora encontraremos la velocidad de pérdida de calor de la campana del disco de freno hacia el ambiente, con las Ecuaciones 4.28 y 4.29:

$$\dot{Q} = h * A_S * \Delta T$$

$$\dot{Q} = h * A_S * (T_S - T_{\infty})$$

Cuadro 21. Velocidad de pérdida de calor en la campana.

DISCO	D.1	D.2	D.3
\dot{Q}_c (W)	46,21	41,36	82,42

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Entonces la velocidad de pérdida de calor total frontal del disco es:

$$\dot{Q}_{\text{Total}} = \dot{Q}_{\text{Periferica}} + \dot{Q}_{\text{Campana}} \quad (4.30)$$

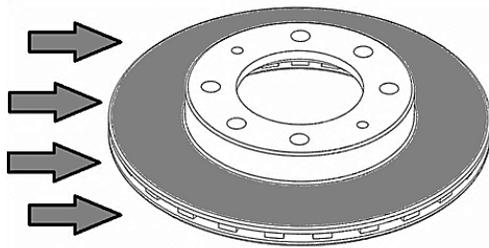
Cuadro 22. Velocidad de pérdida de calor frontal en el disco.

DISCO	D.1	D.2	D.3
\dot{Q}_{Total} (W)	95,96	123,80	162,35

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Convección lateral del disco. La traslación del vehículo con cierta velocidad hace que el aire fluya sobre los discos de manera frontal en dirección de avance del automóvil, con la velocidad del mismo, lo que produce un flujo de aire en las paredes planas del disco, lo cual nos lleva a realizar un análisis de flujo de aire paralelo en placas planas.

Figura 31. Convección lateral en un disco de freno.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Flujo paralelo en placas planas. Si se supone una placa plana sobre la que fluye una corriente fluida, lo primero que sucede es que la velocidad del fluido disminuye a medida que nos aproximamos hacia la superficie de la misma, como consecuencia de las fuerzas de viscosidad. La transmisión de flujo laminar hacia turbulenta depende de la configuración geométrica de la superficie, de su aspereza, de la velocidad de corriente arriba de la temperatura superficial y del tipo de fluido y se caracteriza por el número de Reynolds. El número de Reynolds varía para una placa plana a lo largo del flujo hasta que llegara al final de la placa. Para el flujo de una capa suele considerarse que la transmisión de flujo laminar a turbulento ocurre en el número crítico de Reynolds.

$$Re_{cr} = 5 * 10^5$$

Para un flujo laminar:

$$Nu = \frac{hL}{k} = 0,664 * Re_L^{0,5} * Pr^{\frac{1}{3}} \quad Re < 5 * 10^5$$

Para un flujo turbulento:

$$Nu = \frac{hL}{k} = 0,037 * Re_L^{0,5} * Pr^{\frac{1}{3}} \quad 5 * 10^5 \leq Re \leq 1 * 10^7$$

Para realizar este cálculo suponemos que el disco es una placa plana cuadrada de longitud 0,2362 m, la temperatura del medio ambiente es de 20°C y una temperatura superficial de los discos de 82, 107 y 90°C respectivamente, con una velocidad del aire de 22,22 m/s y a una atmosfera de presión.

Para este tipo de convección Re_L esta dada por:

$$Re_L = \frac{V_m * L}{\nu_D} \quad (4.31)$$

Dónde:

Re_L = Número critico de Reynolds. (Adimensional)

V_m = Velocidad media del aire. (m/s)

L = Longitud de la placa plana. (m)

ν_D = Viscosidad cinemática de Denver. (m²/s)

Las propiedades del aire se toman en consideración a la temperatura de la película como es el caso anterior.

Con la viscosidad cinemática y la presión del aire calculamos la viscosidad de Denver:

$$\nu_D = \frac{\nu}{P} \quad (4.32)$$

Dónde:

ν_D = Viscosidad cinemática de Denver. (m²/s)

ν = Viscosidad cinemática del aire. (m²/s)

P = Presión atmosférica. (Atmosferas)

Entonces para la presión atmosférica de 1 atmosfera, se tiene:

Cuadro 23. Viscosidad cinemática de Denver.

DISCO	D.1	D.2	D.3
ν_D (m ² /s)	$1,8078 * 10^{-5}$	$1,9306 * 10^{-5}$	$1,8470 * 10^{-5}$

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

De la Ecuación 1.31 el Número de Reynolds es:

Cuadro 24. Número de Reynolds para placas planas.

DISCO	D.1	D.2	D.3
Re_L	290343,86	294669,18	361065,63

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

El cual es menor al número crítico de Reynolds por lo tanto es un flujo laminar y el número de Nusselt promedio se determina a partir de la Ecuación:

$$Nu = \frac{hL}{k} = 0,664 * Re_L^{0,5} * Pr^{\frac{1}{3}} \quad (4.33)$$

Cuadro 25. Número de Nusselt para placas planas.

DISCO	D.1	D.2	D.3
Nu	321,04	322,95	357,85

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Con el valor del número de Nusselt se calcula el coeficiente de convección para placas planas, con el diámetro mayor del disco que en este caso será la longitud, según la Ecuación 4.26:

$$h = \frac{k}{L} * Nu$$

Cuadro 26. Coeficiente de convección para placas planas.

DISCO	D.1	D.2	D.3
h (W/m ² * °C)	37,27	35,61	33,04

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Ya se calculó el área superficial de las dos caras del disco en la Ecuación 4.22, cuyo valor es de 0,0801 m².

Entonces la velocidad de transferencia de calor desde el disco hacia el ambiente por convección lateral, con el área del disco, es según las Ecuaciones 4.28 y 4.29:

$$\dot{Q} = h * A_S * \Delta T$$

$$\dot{Q} = h * A_S * (T_S - T_{\infty})$$

Cuadro 27. Velocidad de pérdida de calor por convección lateral.

DISCO	D.1	D.2	D.3
\dot{Q} (W)	136,10	245,69	209,32

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Convección por efecto rotatorio. Para el cálculo de transferencia de calor por efecto giratorio se calcula a partir del Número de Reynolds, las propiedades del aire siguen siendo las mismas consideradas anteriormente.

$$Re_g = \frac{D^2 * \omega}{\nu} \quad (4.34)$$

Dónde:

Re_g = Número de Reynolds. (Adimensional)

D = Diámetro del disco. (m)

ω = Velocidad angular del disco. (rad/s)

ν = Viscosidad cinemática del aire. (m²/s)

La velocidad angular del disco. Los discos de frenos que son motivo del análisis son de un Renault Megane, de una Mitsubishi Vans y de una Toyota Land Cruiser, donde utilizaremos la siguiente Ecuación para determinar el radio interior de la llanta:

$$r = \frac{1}{2} [R + (2 * RNA * b_n)] \quad (4.35)$$

Dónde:

R = Radio de la llanta. (mm)

RNA = Relación nominal de aspecto.

b_n = Ancho del neumático. (mm)

Tabla 17. Geometría del neumático de los vehículos.

GEOMETRÍA DEL NEUMÁTICO DE LOS VEHÍCULOS		
Disco 1	Disco 2	Disco 3
		

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Entonces, según el tipo de rueda del vehículo:

Cuadro 28. Características de la llanta.

DISCO	D.1	D.2	D.3
Designación de la rueda del vehículo	195/55 R15	205/70 R14	265/60 R18
Relación Nominal de Aspecto	55 = 0,55	70 = 0,70	60 = 0,60
Radio de la llanta	15 Pulg = 381 mm	14 Pulg = 355,60 mm	18 Pulg = 457,20 mm
Ancho del neumático	195	205	265

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Entonces, se tiene de la Ecuación 4.35:

Cuadro 29. Radios y diámetros de los discos.

DISCO	D.1	D.2	D.3
r (mm)	297,75	321,30	384,60
r (m)	0,2977	0,3213	0,3846
∅ (m)	0,5954	0,6426	0,7632

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Ahora procedemos a calcular el perímetro de la rueda:

$$P = \pi * \varnothing \tag{4.36}$$

Cuadro 30. Perímetro de la rueda.

DISCO	D.1	D.2	D.3
P (m)	1,8705	2,0188	2,3976

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Calculamos las revoluciones por segundo de la rueda a una velocidad de 22,22 m/s:

$$RPS = \frac{L}{P} \quad (4.37)$$

Dónde:

L = Distancia recorrida por el neumático. (m)

P = Perímetro del neumático. (m)

Entonces, se tiene:

Cuadro 31. Revoluciones por segundo del disco.

DISCO	D.1	D.2	D.3
RPS	11,88	11,01	9,26

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Calculamos las revoluciones por minuto, teniendo en cuenta que 1 minuto son 60 segundos:

Cuadro 32. Revoluciones por minuto del disco.

DISCO	D.1	D.2	D.3
RPM	712,81	660,45	556,11

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Entonces, la velocidad angular es:

$$\omega = \frac{(RPM * 2\pi)}{60} \quad (4.38)$$

Cuadro 33. Velocidad angular del disco.

DISCO	D.1	D.2	D.3
ω (rad/s)	74,64	69,16	58,23

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

De la Ecuación 4.34, con el diámetro mayor el número de Reynolds es:

$$Re_g = \frac{D^2 * \omega}{\nu}$$

Cuadro 34. Número de Reynolds por efecto giratorio.

DISCO	D.1	D.2	D.3
Re_g	230365,63	234780,53	283958,67

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

El número de Reynolds es menor al número crítico de Reynolds, por lo tanto sigue siendo un flujo laminar y el número de Nusselt promedio se determina a partir de la Ecuación:

$$Nu = \frac{hL}{k} = 0,664 * Re_g^{0,5} * Pr^{\frac{1}{3}} \quad (4.39)$$

Cuadro 35. Número de Nusselt por efecto giratorio.

DISCO	D.1	D.2	D.3
Nu	285,97	288,27	317,35

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Según la Ecuación 4.26, calculamos el coeficiente de convección con el diámetro mayor de los discos:

$$h = \frac{k}{L} * Nu$$

Cuadro 36. Coeficiente de convección por efecto giratorio.

DISCO	D.1	D.2	D.3
h (W/m ² * °C)	33,19	31,90	29,30

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Entonces la pérdida de calor con el área del disco y con las Ecuaciones 4.28 y 4.29, es:

$$\dot{Q} = h * A_S * \Delta T$$

$$\dot{Q} = h * A_S * (T_S - T_{\infty})$$

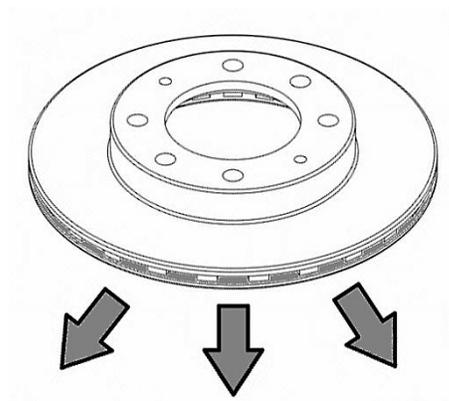
Cuadro 37. Velocidad de pérdida de calor por efecto giratorio.

DISCO	D.1	D.2	D.3
\dot{Q} (W)	121,23	220,09	185,63

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Convección en el interior de los ductos. El flujo de líquidos o gases por tubos o ductos es de uso común en aplicaciones de calefacción o enfriamiento, lo cual tomaremos este tema para analizar la disipación de calor del disco de frenos ventilado.

Figura 32. Conductos de ventilación del disco de freno.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Los tubos no circulares se suelen usar en aplicaciones tales como los sistemas de ventilación o enfriamiento, en vista de esto y analizando el disco de freno en la Figura 32. Tenemos un sistema de ventilación entre las dos secciones del disco, lo que forman un sistema de enfriamiento por tubos no circulares.

El primer paso para realizar este cálculo es determinar las velocidades de entrada y de salida del aire en los ductos del disco. Este cálculo se realiza solo para un ducto, puesto que la geometría del mismo es igual en toda su área.

Para el cálculo de velocidades se va a utilizar la teoría de ventiladores radiales del libro de Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas de Claudio Mataix.³⁶

Para este caso el caudal es:

$$Q = \pi * b_1 * D_1 * C_{1m} \quad (4.40)$$

Dónde:

Q = Caudal de aire en el interior del ducto. (m^3/s)

b_1 = Ancho del rodete a la entrada del flujo. (m)

D_1 = Diametro de ingreso. (m)

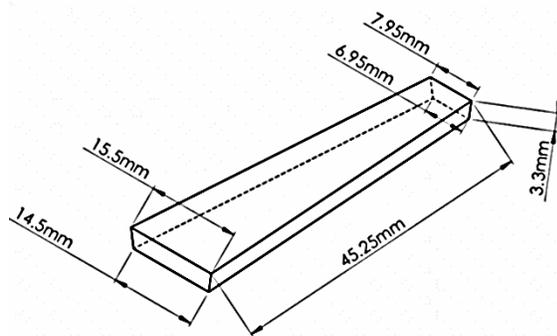
C_{1m} = Velocidad absoluta del fluido a la entrada del ducto. (m/s)

Con el cálculo de las velocidades de entrada y salida en los álabes se determinara el coeficiente de convección de los canales. Como se plantea en el libro de Mecánica de fluidos y Maquinas hidráulicas de Claudio Mataix.

Velocidad de entrada. Escogemos la velocidad angular que obtuvimos de los cálculos anteriores con la velocidad de 80 Km/h y el diámetro interior del disco y se tiene:

En la Figura 33, 34 y 35, se muestran dimensiones medias de los ductos de ventilación de los discos y por la forma del mismo.

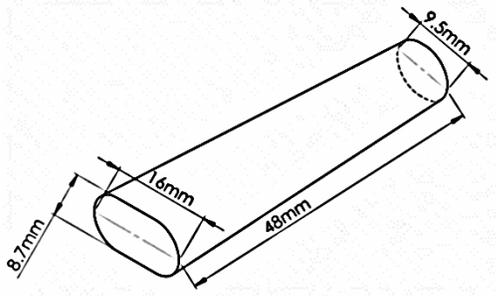
Figura 33. Dimensiones del ducto de ventilación del disco de freno 1.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

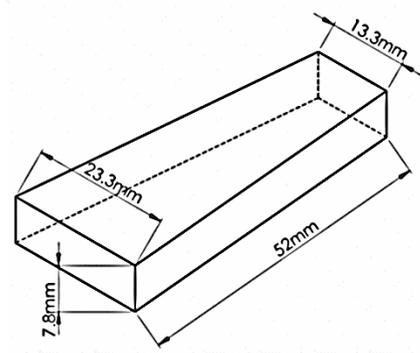
³⁶ **MATAIX, Claudio.** Mecánica de fluidos y Máquinas Hidráulicas segunda edición. Madrid, España: Castillo S.A. 1996. 423-435 p.

Figura 34. Dimensiones del ducto de ventilación del disco de freno 2.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Figura 35. Dimensiones del ducto de ventilación del disco de freno 3.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Como el disco experimenta una entrada radial de aire esto significa que la velocidad absoluta del fluido corresponde al mismo valor que la componente meridional de la velocidad absoluta del aire de entrada por lo tanto:

$$C_1 = C_{1m}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

Entonces la velocidad absoluta del ducto es:

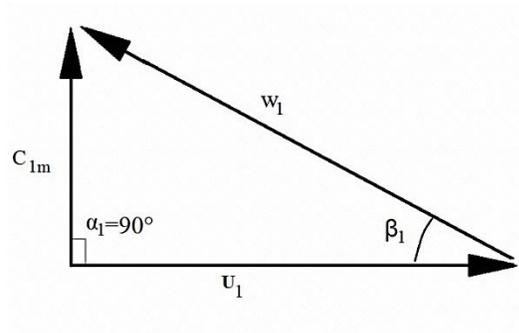
$$u_1 = \frac{\pi * D_1 * n}{60} \tag{4.41}$$

u_1 = Velocidad absoluta a la entrada del ducto. (m/s)

D_1 = Diametro de entrada. (m)

n = Revoluciones por minuto. (RPM)

Figura 36. Triángulo de velocidades a la entrada del aire.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Entonces, se tiene:

Tabla 18. Anchos y velocidades a la entrada del ducto.

DISCO	D.1	D.2	D.3
Diámetro a la entrada del flujo D_1 (m)	0,1352	0,1226	0,1801
Ancho del rodete a la entrada b_1 (m)	0,00745	0,0095	0,0133
Velocidad absoluta u_1 (m/s)	5,0460	4,2397	5,2441

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Para calcular el ángulo β_1 del triángulo de velocidades, utilizando las entidades trigonométricas:

$$\text{Tan } \beta_1 = \frac{C_1}{u_1} \quad (4.42)$$

Cuadro 38. Ángulo beta a la entrada del ducto.

DISCO	D.1	D.2	D.3
β_1 (Grados)	45°	45°	45°

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Ahora hallamos la velocidad relativa del fluido con respecto al ducto:

$$w_1 = \sqrt{C_1^2 + u_1^2} \quad (4.43)$$

Cuadro 39. Velocidad relativa a la entrada del fluido con respecto al ducto.

DISCO	D.1	D.2	D.3
w_1 (m/s)	7,13	5,99	7,41

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Entonces de la Ecuación 4.40, se tiene:

$$Q = \pi * b_1 * D_1 * C_{1m}$$

Cuadro 40. Caudal del fluido por los ductos.

DISCO	D.1	D.2	D.3
Q (m ³ /s)	0,01596	0,01551	0,03946

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

De acuerdo a la ecuación de continuidad el caudal a lo largo del ducto es el mismo, lo que varía es la velocidad y como b es el ancho del rodete a la salida del flujo, y cuyo valor es $b_2 = 0,015$ m, y el diámetro externo es $D_2 = 0,2632$ m, por lo tanto:

$$Q = \pi * b * D_2 * C_{2m} \tag{4.44}$$

Dónde:

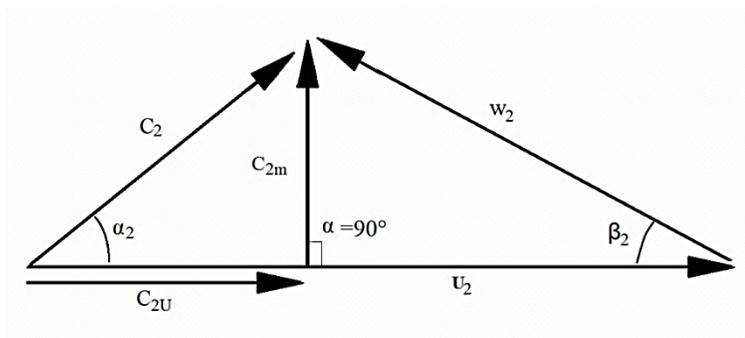
Q = Caudal de aire en el interior del ducto. (m³/s)

b_2 = Ancho del rodete a la salida del flujo. (m)

D_2 = Diametro de salida. (m)

C_{2m} = Velocidad absoluta del fluido a la salida del ducto. (m/s)

Figura 37. Triángulo de velocidades a la salida del aire.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

De la Ecuación 4.44, despejando la velocidad absoluta del fluido a la salida, se tiene:

$$C_{2m} = \frac{Q}{\pi * b_2 * D_2}$$

Cuadro 41. Velocidad absoluta del fluido a la salida.

DISCO	D.1	D.2	D.3
C_{2m} (m/s)	1,43	1,20	1,79

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Entonces la velocidad absoluta del ducto es:

$$u_2 = \frac{\pi * D_2 * n}{60} \quad (4.45)$$

u_2 = Velocidad absoluta a la salida del alabe. (m/s)

D_2 = Diametro de salida. (m)

n = Revoluciones por minuto. (RPM)

Se tiene que:

Cuadro 42. Velocidad absoluta a la salida del ducto.

DISCO	D.1	D.2	D.3
u₂ (m/s)	8,81	8,85	8,73

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Para calcular el ángulo β_2 del triángulo de velocidades, utilizando las entidades trigonométricas:

$$\text{Tan } \beta_2 = \frac{C_{2m}}{u_2} \quad (4.46)$$

Cuadro 43. Ángulo beta a la salida del ducto.

DISCO	D.1	D.2	D.3
β_2 (Grados)	9,23°	7,75°	11,61°

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Ahora hallamos la velocidad relativa del fluido con respecto al ducto:

$$w_2 = \sqrt{C_{2m}^2 + u_2^2} \quad (4.47)$$

Cuadro 44. Velocidad relativa a la salida del fluido con respecto al ducto.

DISCO	D.1	D.2	D.3
w_2 (m/s)	8,93	8,93	8,92

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Ahora hallamos la componente periférica de la velocidad absoluta a la salida:

$$C_{2u} = u_2 - \frac{C_{2m}}{\tan \beta_2} \quad (4.48)$$

Cuadro 45. Velocidad periférica absoluta a la salida del ductos.

DISCO	D.1	D.2	D.3
C_{2u} (m/s)	6,55	8,83	7,65

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Procedemos a calcular la velocidad absoluta del fluido a la salida, mediante la siguiente Ecuación:

$$C_2 = \sqrt{C_{2u}^2 + C_{2m}^2} \quad (4.49)$$

Cuadro 46. Velocidad absoluta del fluido a la salida del ductos.

DISCO	D.1	D.2	D.3
C_2 (m/s)	6,70	8,92	7,85

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Para calcular el ángulo α_2 del triángulo de velocidades, utilizando las entidades trigonométricas:

$$\tan \alpha_2 = \frac{C_{2m}}{C_{2u}} \quad (4.50)$$

Cuadro 47. Ángulo alfa a la salida del ductos.

DISCO	D.1	D.2	D.3
α_2 (Grados)	12,34°	7,76°	13,21°

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Con estas velocidades obtenidas en la entrada y salida en los ductos del disco procedemos a calcular la transferencia de calor por convección.

Calculamos la velocidad media del fluido:

$$V_m = \frac{C_{1m} + C_{2m}}{2} \quad (4.51)$$

Se tiene que:

Cuadro 48. Velocidad media del fluido.

DISCO	D.1	D.2	D.3
V_m (m/s)	3,24	2,72	3,52

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

El diámetro hidráulico promedio es:

$$D_h = \frac{D_{hE} + D_{hS}}{2} \quad (4.52)$$

Dónde:

D_h = Diámetro hidráulico. (m)

D_{hE} = Diámetro hidráulico de entrada. (m)

D_{hS} = Diámetro hidráulico de salida. (m)

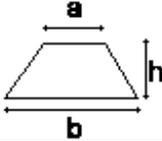
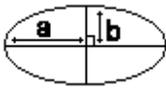
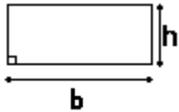
El diámetro hidráulico de entrada para un ducto rectangular, tiene la siguiente expresión:

$$D_h = \frac{4 * A_c}{p} \quad (4.53)$$

Dónde:

A_C = Área de la sección transversal. (m²)
 p = Perímetro de la sección transversal. (m²)

Tabla 19. Geometrías y áreas de la sección transversal de los ductos.

DISCO	D.1	D.2	D.3
Sección transversal	Trapezio	Elipse	Rectángulo
Geometría del canal			
Área m ²	$\frac{(b + a) * h}{2}$	$\pi * a * b$	$a * h$
Perímetro m ²	$b + a + 2h$	$2\pi \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}}$	$2(a + h)$
Valores a la entrada	a = 0,00695 b = 0,00795 h = 0,00344	a = 0,00475 b = 0,00425	a = 0,0133 h = 0,0078
Valores a la salida	a = 0,01450 b = 0,01550 h = 0,00344	a = 0,00800 b = 0,00425	a = 0,0233 h = 0,0078
D_{hE} (m)	0,004500	0,008958	0,009833
D_{hS} (m)	0,005600	0,010600	0,011680
D_h (m)	0,005050	0,009779	0,010750

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Las propiedades del aire se mantienen a 51°C, con estos valores encontramos el número de Reynolds:

$$Re = \frac{V_m * D_h}{\nu} \quad (4.54)$$

Dónde:

Re = Número de Reynolds. (Adimensional)

V_m = Velocidad media del fluido. (m/s)

D_h = Diámetro hidráulico. (m)

ν = Viscosidad cinemática del aire. (m²/s)

Cuadro 49. Número de Reynolds por convección entre los ductos.

DISCO	D.1	D.2	D.3
Re	884,97	1379,01	2048,84

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

El número de Reynolds es menor que 10000, por lo tanto es un flujo laminar, y el número de Nusselt se toma de la Tabla 8.1 del libro de transferencia de calor de Yunus A. Cengel, presente en el ANEXO D, con las dimensiones del ducto a la entrada del flujo. La cual es:

Cuadro 50. Valores de a y b para el número de Nusselt.

DISCO	D.1	D.2	D.3
a/b	2,7575	1,0919	1,7051

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Interpolando el número de Nusselt con los a/b de casa disco, escogemos a temperatura constante y se tiene:

Cuadro 51. Número de Nusselt por convección entre los ductos.

DISCO	D.1	D.2	D.3
Nu	3,8217	3,6672	3,2690

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Y el coeficiente de convección es según la Ecuación 4.26:

$$h = \frac{k}{D_h} * Nu$$

Cuadro 52. Coeficiente de convección por los ductos.

DISCO	D.1	D.2	D.3
h (W/m ² * °C)	21,22	10,62	8,42

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

A continuación encontraremos el área superficial en el ducto:

$$A_S = P * d \tag{4.55}$$

Dónde:

A_S = Área superficial en el ducto. (m²)

d = Largo del ducto. (m)

p = Perímetro de la sección transversal. (m²)

Entonces, se tiene:

Tabla 20. Diámetros y áreas de los ductos.

DISCO	D.1	D.2	D.3
d (m)	0,04525	0,04800	0,05200
A_{S_E} (m²)	0,0009862	0,001358	0,002194
A_{S_S} (m²)	0,0016690	0,001929	0,003234
A_S (m²)	0,0013270	0,001643	0,002714

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Por lo tanto la velocidad de pérdida de calor con las Ecuaciones 4.28 y 4.29, es:

$$\dot{Q}_{\text{Ducto}} = h * A_S * \Delta T$$

$$\dot{Q}_{\text{Ducto}} = h * A_S * (T_S - T_{\infty})$$

Ahora se calcula la pérdida total de calor en los ductos de ventilación de los discos, se tiene:

Cuadro 53. Pérdida de calor total en los ductos de ventilación.

DISCO	D.1	D.2	D.3
\dot{Q}_{Ducto} (W)	1,7459	1,5186	1.6008
Cantidad de ductos	30	36	24
$\dot{Q}_{\text{Total Ductos}}$ (W)	52,37	54,66	38,41

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Se determinaron las velocidades de calor que los discos emiten al ambiente, como sabemos un disco ventilado pierde calor más rápidamente que un disco macizo, si sumamos todos los valores de pérdidas de calor se puede apreciar mejor.

4.3 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES METALGRÁFICAS, MECÁNICAS, ESTRUCTURALES Y TÉRMICAS DE LOS FRENOS DE DISCO, A TRAVÉS DE ENSAYOS DE LABORATORIO Y CON LA AYUDA DE LOS SOFTWARE ANSYS Y SOLIDWORKS.

A continuación se analizaron las propiedades de dureza, metalografía y compresión, incluido el análisis estructural estático y térmico de los discos.

4.3.1 Características de dureza. La prueba de dureza Rockwell se realizó en el laboratorio de Materiales Metálicos de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, en el durómetro digital marca Mitutoyo con una capacidad de 150 KgF (ver Figura 22) los datos fueron tomados según la norma ASTM E18 y ASTM A370 para la realización de este ensayo presentes en los ANEXOS E, H e I. Las condiciones del ensayo fueron una carga de 100 KgF con un penetrador de bola de hierro de 1/16 mm, de esta manera dependiendo de la dimensión de la muestra se tomaron los diferentes puntos de referencia sobre la superficie.

Como lo indica la Norma ASTM E18, se deben tomar varios puntos de referencia de dureza a lo largo de la superficie y luego determinar un promedio para estandarizar la dureza que presenta el material, debido a que el material es muy blando se estableció la prueba de dureza Rockwell B en donde se obtuvieron los siguientes resultados:

Figura 38. Durómetro digital marca Mitutoyo.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Figura 39. Cargas para los diferentes tipos de dureza Rockwell.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Figura 40. Muestras de los 3 discos.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

La ecuación para evaluar el promedio de las durezas tomadas en los diferentes puntos de la probeta es:

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

Dónde:

H_1 , H_2 y H_n = Puntos de dureza.

n = Numero de muestras.

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

Tabla 21. Dureza Rockwell para los tres discos.

MUESTRA	DISCO 1	DISCO 2	DISCO 3
PUNTO	VALOR HRB		
1	81,9	80,4	70,6
2	85,2	85,7	71,5
3	87,4	80,7	69,9
4	88,3	77,3	87,0
5	84,2	76,0	86,5
6	82,8	82,4	80,4
7	82,9	80,5	90,8
8	---	78,7	90,9
9	---	---	90,0
PROMEDIO	84,7	80,2	82,0

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

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

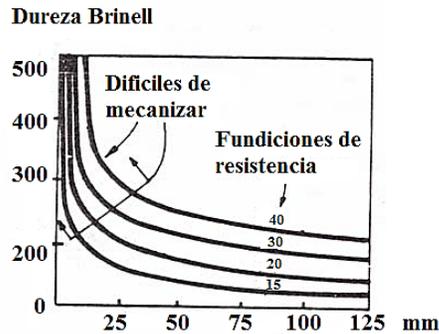
Tabla 22. Valores de dureza Rockwell y Brinell.

MUESTRA	DISCO 1	DISCO 2	DISCO 3
VALOR PROMEDIO HRB	84,7	80,2	82,0
VALOR HB	164	151	156

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

De la Tabla 3 de la sección anterior, se pueden obtener los valores de las durezas Brinell para los diferentes tipos de fundiciones. En el caso de la fundición gris, se determinó que posee una dureza entre 140 y 250 Brinell, lo que resulta que se puede mecanizar fácilmente según la Figura 41.

Figura 41. Dureza Brinell para diferentes fundiciones.



Fuente. ASHBY, Michael y Jones, Daniel. Materiales para ingeniería

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

El cambio térmico a los cuales están sometidos los discos por el efecto de la fricción interfieren en variaciones en la microestructura del material y en sus propiedades intrínsecas, de esta manera se genera la pérdida de dureza, aceleración de la corrosión y de las demás propiedades Físico-Mecánicas.

4.3.2 Análisis metalográfico. Las muestras para el análisis metalográfico fueron extraídas de la pista de frenaje del disco, presente en la Figura 42, se utilizó la norma ASTM A247 presente en el ANEXO G la cual especifica el procedimiento adecuado y así poder observar la microestructura del material la cual debe obtener un pulido tipo espejo para mejores resultados en el microscopio, para obtener este pulido se debe proceder a 5 pasos que son:

Figura 42. Extracción de la probeta para el análisis metalográfico.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

1. SELECCIÓN Y EXTRACCIÓN, equipo de corte con hoja abrasiva y lubricante. Una vez obtenida la muestra es necesario seleccionarla y cortarla en forma determinada, se trata de lograr superficies planas con la menos deformación posible de la superficie. En general, para materiales blandos como es el caso de la fundición gris, se cortan con discos duros, un factor importante a tener en cuenta es la temperatura generada por el rozamiento en el corte, el cual se debe realizar con liquido lubricante y refrigerante a la vez, en caso de corte manual se estaría modificando la estructura original de la muestra. En este paso se utilizó la cortadora de precisión Pico155 marca Dace Technologies (ver Figura 43), que para este tipo de material férreo se utiliza un disco de corte diamantado a una velocidad promedio de 500 rpm y un lubricante a base de agua.

Figura 43. Cortadora Pico155.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

2. MONTAJE, recubrimiento de la muestra. La muestra se coloca en una prensa generalmente hidráulica, en donde se le añade luego un polímero o baquelita. En este paso se utilizó el montaje de presión neumática TP-7001 marca Dace Technologies (ver Figura

44), aquí se recubrió la muestra a base de resina fenólica (Polímero), el proceso de esta máquina dura aproximadamente 8 minutos en donde se calienta hasta 200°C a una presión de 90 Psi para que este se adhiera a la muestra, se espera a que se enfríe la muestra mediante la programación de la máquina y luego se saca la muestra.

Figura 44. Montaje de presión TP-7001.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

3. PULIDO, obtención de la superficie tipo espejo. Para eliminar el material de la superficie de la muestra, se utilizan abrasivos cada vez con partículas más finas. En este paso se utilizó el pulidor automatizado Nano 2000T marca Dace Technologies (ver Figura 45), en donde se utilizaron las siguientes lijas de carburo de silicio por tiempos según la norma ASTM A247 y consideraciones del fabricante de la máquina, según la Tabla 23:

Figura 45. Pulidor automatizado Nano 2000T.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Tabla 23. Proceso de pulido.

ABRASIVO / SUPERFICIE	LUBRICANTE	FUERZA	ACELERACIÓN (Superior/Inferior)	TIEMPO
Papel abrasivo 240	Agua	5-10 Lb	200 rpm/200 rpm	Hasta aplanar
Papel abrasivo 360				1 minuto
Papel abrasivo 600				1 minuto
Papel abrasivo 800				1 minuto
Papel abrasivo 1200				1 minuto
Paño de pulir (GOLPAD) con diamante policristalino (DIAMANT)	Lubricante púrpura (DIALUBE)	5-10 Lb	200 rpm/200 rpm	2 minutos
Paño de pulir (TRICOTE-MICROPAD) con alúmina 0,05 µm		5-10 Lb	100 rpm/100 rpm	1 minuto

Fuente. Metallographics Handbook.

Luego se montan cada una de las lijas en la máquina y cumpliendo los tiempos establecidos en la Tabla 23 para obtener la superficie tipo espejo que es la ideal para poder observar en el microscopio la estructura del material.

4. GRABADOS DE ACERO AL CARBONO, ataque químico. Todo material distorsionado resultante de los varios pasos de la preparación debe ser completamente removido de la superficie antes de observar la muestra bajo el microscopio. El ataque se realizó aplicándole una gota de solución ácida la cual ataca la superficie a una velocidad que varía con la orientación cristalina de la misma. Como los cristales de un metal tienen usualmente distintas orientaciones, los cristales adyacentes se disuelven por la solución de ataque a diferentes profundidades, produciendo el efecto de altiplano.

Después del ataque las interacciones de los límites de granos atacados en la superficie, quedan marcados por una red de escarpaduras poco profundas. Estas superficies casi verticales no reflejan la luz en la lente de los objetivos del microscopio en la misma forma que las superficies horizontales y formas de los cristales que quedan entre ellos, y como resultado, se observara la posición de los límites de los cristales. Se utilizó Nital al 2% el cual está compuesto de 2 ml de ácido nítrico y 98 ml de alcohol etílico, las probetas fueron atacadas por un lapso de aproximadamente un minuto.

Figura 46. Muestras atacadas con Nital al 2%.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

5. ANÁLISIS METALOGRAFICO, imágenes de las muestras. Este último paso fue realizado en un Microscopio óptico de marca Optiks con una magnificación de 600X (ver Figura 47), el cual mediante la cámara y el software que posee la misma se obtienen las imágenes de la metalografía o microestructura de las muestras analizadas a diferentes acercamientos para cada una de las muestras a las cuales se les realizó el debido proceso.

Figura 47. Microscopio óptico de marca Optiks.



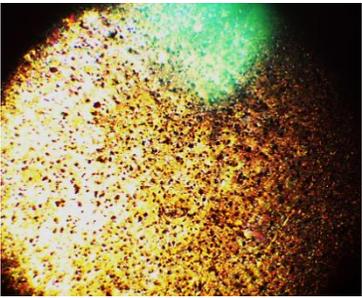
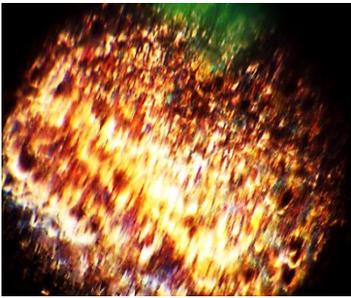
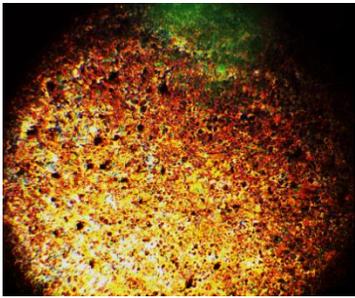
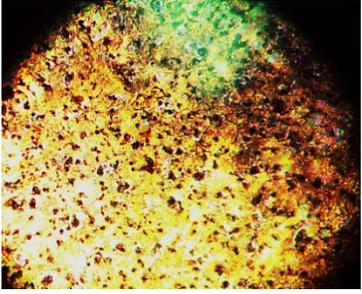
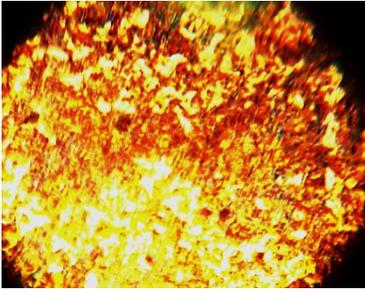
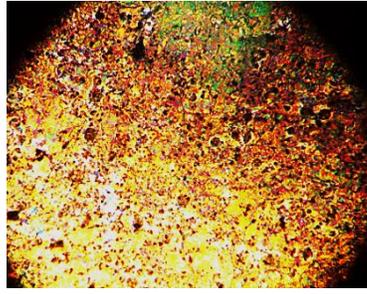
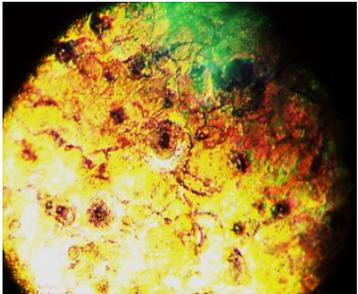
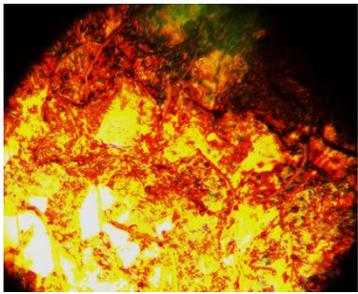
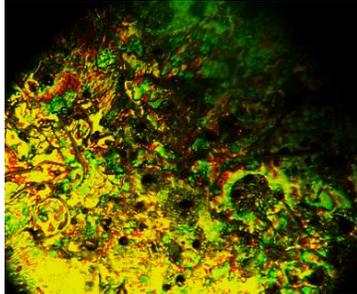
Fuente. Autor del proyecto de investigación.

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

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

Luego de realizar los cinco pasos para la obtención de la muestra se obtuvieron las siguientes imágenes del microscopio, presentes en la Tabla 24.

Tabla 24. Resultados obtenidos en el microscopio.

MUESTRAS EN EL MICROSCOPIO		
Disco 1	Disco 2	Disco 3
Con un acercamiento a 50X		
		
Con un acercamiento a 100X		
		
Con un acercamiento a 400X		
		

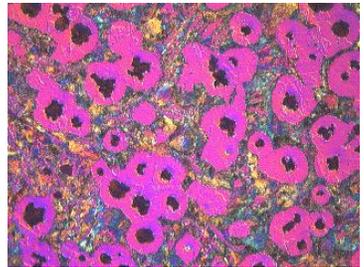
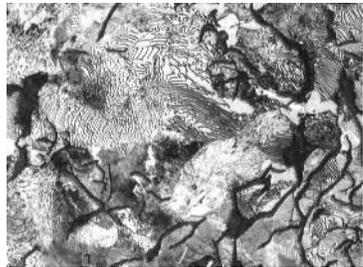
Continuación Tabla 24.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Se tomó como referencia al catálogo de Metallographics Handbook, el cual especifica que para los hierros de fundición gris las siguientes características de la microestructura del material:

Tabla 25. Características metalográficas de la Fundición gris.

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

Fuente. Metallographics Handbook.

Para las imágenes analizadas y tomadas en el microscopio, se observaron las características de las mismas y se determinó que pertenece a una Fundición Gris Perlítica. Su estructura está formada de nodulos con inclusiones de grafito laminar presente en la Tabla 25 en un acercamiento a 600X, el grafito se ve en forma de vetas pequeñas. Como se sabe, la perlita contiene un 0,8 % de Carbono, por consiguiente, esta unidad de carbono se halla en la fundición perlítica gris en estado ligado, es decir, en forma de cementita. La cantidad restante se encuentra en estado libre, o sea, en forma de grafito. De esta manera por la geometría en las muestras de fundición gris ordinaria el grafito toma la forma de vetas pequeñas, este grafito se llama laminar. En la figura de fundición gris a 600X se muestra la

estructura de una fundición ferríticas en donde el carbono se encuentra en estado libre, formando vetas de grafito en forma de láminas.

Debido a la estructura de las muestras analizadas es un grafito tipo C, cuando una fundición tiene composición hipereutéctica $\%C + \%Si / 3 + \%P / 3$, es superior a 4,25 %, la solidificación comienza con la formación de grafito primario, en el intervalo entre la temperatura del líquido y la temperatura eutéctica. Este grafito se desarrolla libremente en el interior del líquido, sin obstáculos para su crecimiento, y proporciona láminas rectas cuyo espesor supera al que presentará el grafito eutéctico cuando llegue a formarse. Este grafito tipo C posee resistencia al choque térmico, pero débil resistencia a la tracción.

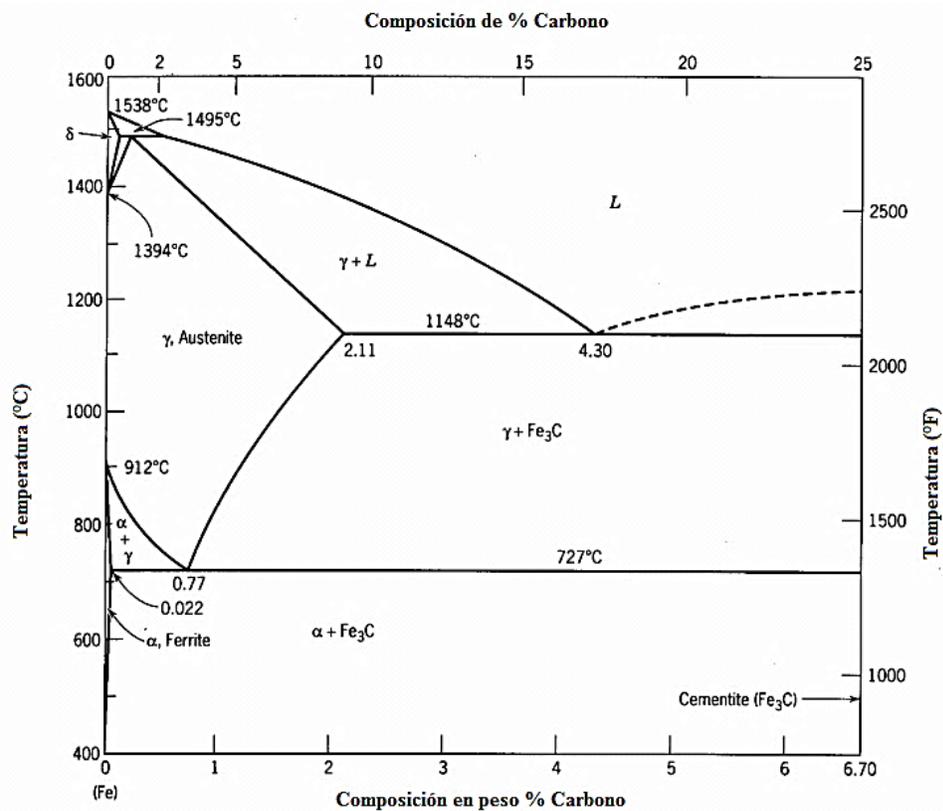
Es interesante señalar que en la práctica es muy difícil encontrar fundiciones en las que todo el carbono aparezca en forma de grafito, como se acaba de indicar. Sin embargo, se hace referencia a esta clase de fundición que casi puede considerarse como teórica, porque creemos que señalándolas se facilita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

Por lo general, la fundición con grafito nodular se llama fundición maleable. De este modo, la fundición laminar se llama fundición gris ordinaria, y la fundición con grafito esferoidal, fundición de alta resistencia.

Diagrama de hierro carbono. En la Figura 49 se muestran las fases de las aleaciones Fe - C. Las líneas continuas determinan la temperatura de las fases de equilibrio de austenita - ferrita - cementita y las líneas discontinuas, la fase de equilibrio entre la austenita, ferrita y el grafito.

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

Figura 48. Diagrama Hierro carbono.



Fuente. Metallographics Handbook.

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

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

De esta manera aparece la fatiga que se define como una fractura progresiva, se produce cuando una pieza mecánica está sometida a un esfuerzo repetido o cíclico, por ejemplo una vibración. Aunque el esfuerzo máximo nunca supere el límite elástico, el material puede romperse incluso después de poco tiempo. En algunos metales, como las aleaciones de

titanio, puede evitarse la fatiga manteniendo la fuerza cíclica por debajo de un nivel determinado. En la fatiga no se observa ninguna deformación aparente, pero se desarrollan pequeñas grietas localizadas que se propagan por el material hasta que la superficie eficaz que queda no puede aguantar el esfuerzo máximo de la fuerza cíclica.

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

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

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

Límite de Resistencia: Puede ser determinado solo en caso de ocurrir una fractura si esto llega a ocurrir esta magnitud se calcula a partir de la fuerza máxima.

El ensayo de compresión fue realizado en la Prensa Universal modelo 50 K marca Pinzuar Ltda., la cual posee una capacidad de 1000 KN presente en la Figura 50, la máquina está programada de acuerdo a las dimensiones de cada una de las muestras y una vez iniciado el ensayo, el Software toma las lecturas de la prueba cada 0.06 segundos de acuerdo a la velocidad programada que para este caso fue de 6 mm/min.

Figura 49. Prensa Universal modelo 50 K marca Pinzuar Ltda.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Las probetas o muestras para los ensayos de compresión de materiales metálicos fueron extraídas de la pista de disco (Ver Figura 51), tomando como referencia la norma ASTM E9-89a, presentes en el ANEXO F, donde especifica cada uno de los procedimientos y dimensiones de las probetas. En la realización este ensayo fueron extraídas 2 muestras de cada uno de los discos, directamente de la pista de frenaje ya que esta parte del disco es donde el material experimenta los mayores esfuerzos por fricción y cambios de temperatura. Una de las características principales es que los extremos deben ser planos para no causar concentraciones de esfuerzos y debe ser perpendiculares al eje de la pieza y del mismo espesor para no causar flexión debida a carga excéntrica.

Figura 50. Extracción de las probetas de compresión.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Luego de la extracción de las probetas según la norma, se procede a la medición de las mismas con un calibrador pie de rey, en donde se obtuvieron las siguientes medidas, presentes en la Tabla 26:

Tabla 26. Dimensiones de la probeta al inicio del ensayo.

PROBETA	Dimensiones en Milímetros		
	a	B	C
Disco 1	30,5	15,8	46,5
Disco Porción 1	9	6,5	47
Disco 2	25	19,5	50,7
Disco Porción 2	9	5,2	52
Disco 3	48,8	19,6	54,8
Disco Porción 3	13	6,5	53

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Después de tener las probetas se procede a montarla en la máquina y aplicarle las respectivas cargas para la realización del ensayo, en donde se obtuvieron los siguientes resultados, presentes en la Tabla 27.

Tabla 27. Ensayo de compresión.

ENSAYO MAQUINA UNIVERSAL			
Disco 1		Disco Porción 1	
	Carga Máxima Aplicada 329,96 kN		Carga Máxima Aplicada 25,28 kN
Disco 2		Disco Porción 2	
	Carga Máxima Aplicada 262,97 kN		Carga Máxima Aplicada 20,08 kN
Disco 3		Disco Porción 3	
	Carga Máxima Aplicada 170,49 kN		Carga Máxima Aplicada 16,20 kN

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

En lo que respecta a los resultados de las cargas aplicadas progresivamente y la gráfica Esfuerzo-Deformación que arrojó el Software de la maquina universal, en donde se especifica la resistencia real y la carga máxima, además pone evidencia cada una de las zonas Elástica, Plástica y el punto de fractura aplicadas en cada una de las probetas, se pueden observar en los ANEXOS J, K, L, M, N y O.

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

Tabla 28. Dimensiones de la probeta después del ensayo.

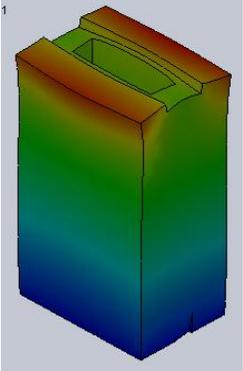
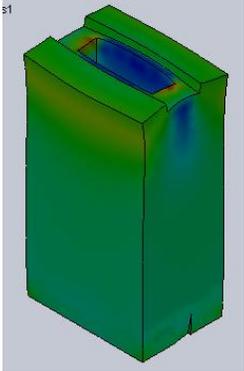
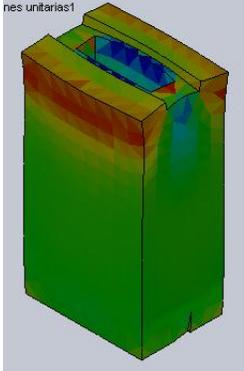
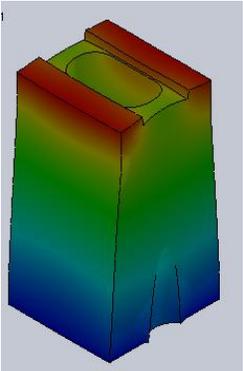
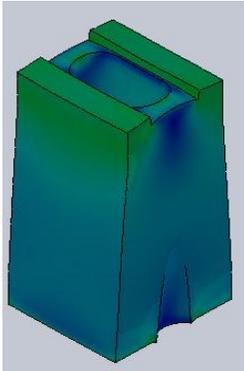
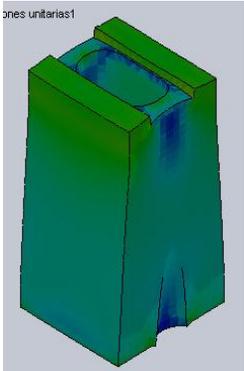
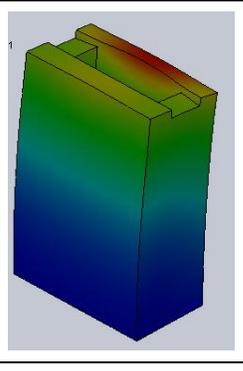
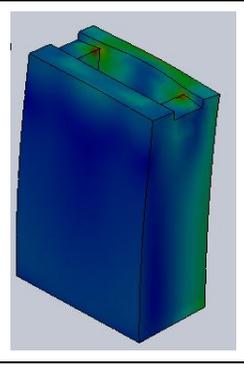
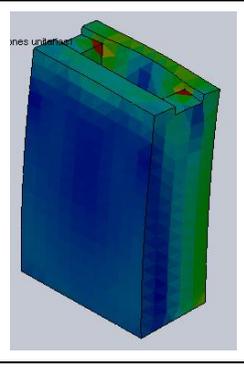
PROBETA	Dimensiones en Milímetros		
	a	b	C
Disco 1	33,5	16,4	44,5
Disco Porción 1	9,5	7	45
Disco 2	26	20	48,7
Disco Porción 2	9,5	4,9	50
Disco 3	50,8	20	50,8
Disco Porción 3	13,5	7	52

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

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

En lo que respecta a el software SolidWorks, se simulo el efecto de la carga ultima aplicada por la maquina universal sobre cada una de las muestras sin el efecto de desgaste generado por la corrosión, en donde se observó que las pérdidas en las propiedades Físico-Mecánicas del material se ven bruscamente afectadas. Como se puede ver en la Tabla 29 en el ensayo realizado en la maquina universal a las muestras se le observan grietas y partiduras debido a la aceleración del proceso de corrosión por el efecto de los cambios térmicos en el material y las variables ambientales del medio. Por otra parte las cargas últimas aplicadas a las muestras de los discos y las porciones, se observó que estos debido al material mantienen una carga nominal dependiendo de la sección y área de la muestra a la que se le vaya a realizar el ensayo.

Tabla 29. Simulación del ensayo de compresión mediante el Software SolidWorks.

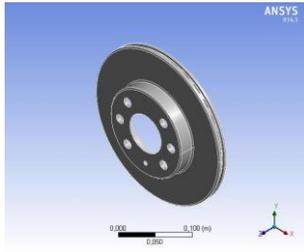
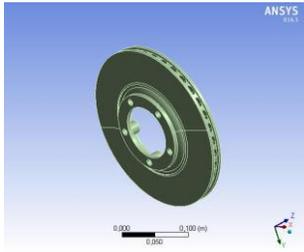
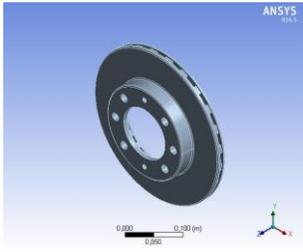
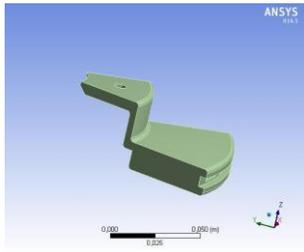
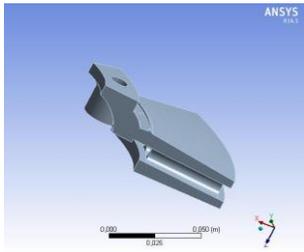
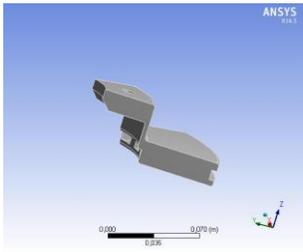
ENSAYO DE COMPRESION			
Ensayo Maquina Universal	Solid Works		
	Desplazamiento estático	Tensión de Von mises	Deformación unitaria
Muestra Disco 1			
			
Muestra Disco 2			
			
Muestra Disco 3			
			
Concentración del Esfuerzo			

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

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

La geometría y planos de los discos se realizaron mediante el software SolidWorks presentes en los ANEXOS P, Q, R, S, T y U, las cuales fueron importadas al software Ansys Inc. para realizar el respectivo procedimiento y análisis estructural estático.

Tabla 30. Geometría de los discos.

DISCO	D.1	D.2	D.3
Geometría			
	Porción		
			

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

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

Conjuntamente en la Tabla 31, se puede observar en la simulación de los tres discos que las deformaciones más grandes presentadas en cada uno de ellos se evidencia en los extremos del mismo que resultan ser milimétricas. A causa del desgaste generado por el área de contacto con las pastillas del sistema de frenado.

Tabla 31. Deformaciones totales en los discos.

DISCO	D.1	D.2	D.3
Deformación total			

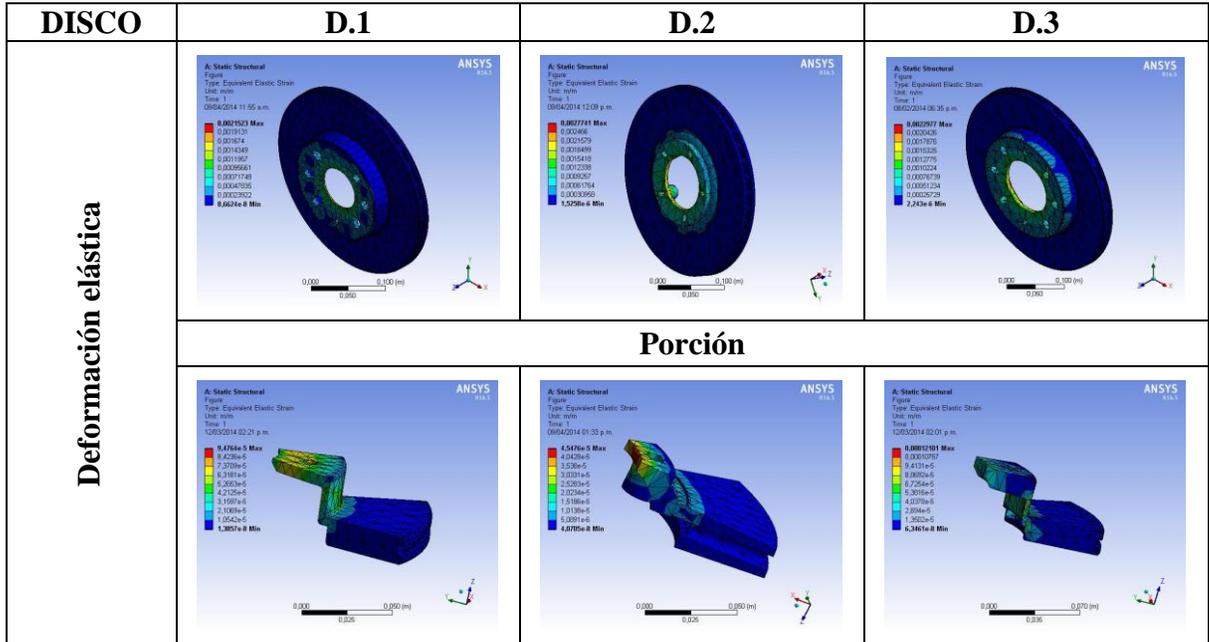
Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Tabla 32. Tensiones de Von Mises para los discos.

DISCO	D.1	D.2	D.3
Tensión de Von Mises			

Fuente. Autor del proyecto de investigación.

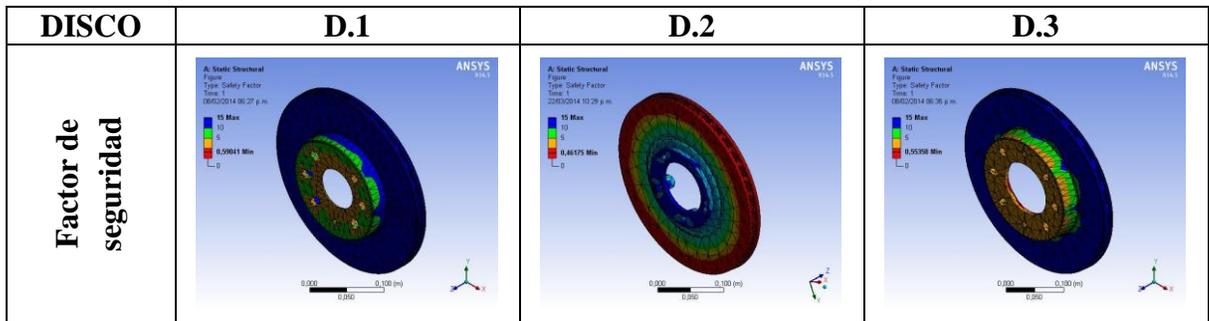
Tabla 33. Deformaciones elásticas en los discos.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Por otra parte el esfuerzo de von mises y el estrés elástico (ver Tabla 32 y 33) resultan ser mínimos y milimétricos sobre el área de contacto con las pastillas del sistema de frenado, de tal manera se produce la uniformidad de área en esta parte del disco.

Tabla 34. Factor de seguridad en los discos.



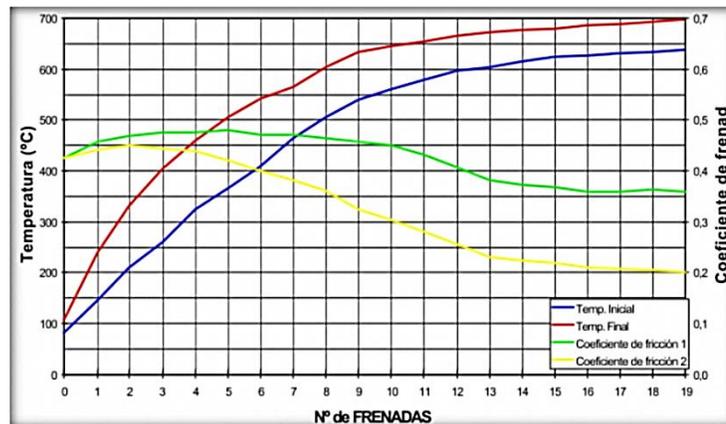
Fuente. Autor del proyecto de investigación.

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

4.3.5 Análisis térmico. El fading es la pérdida de eficacia del sistema de frenos cuando las temperaturas de los elementos en fricción sean altas. Los materiales de fricción presentan una variación de su coeficiente en función de la temperatura, si este coeficiente empieza a bajar drásticamente a temperaturas bajas, en donde se producirá el efecto fading. En este test se comparó cómo se comportan dos materiales de fricción, el cual se realiza en un banco dinamométrico por inercia, y cuyos aparatos de medición indican cada uno de los parámetros de la simulación de frenada.

Se observa que la prueba se realiza en 20 frenadas de 80 Km/h hasta 0 Km/h, además mide la temperatura inicial de frenada y la final de frenada, así como el coeficiente de fricción de los materiales, con una deceleración media de 4 m/s^2 . Para obtener esta deceleración se aplica una determinada presión en el circuito de frenos.

Figura 51. Valores de prueba de test fading.



Fuente. Roadhouse. Manual técnico de la pastilla de freno (Discos de frenos).

Los valores de coeficiente de fricción por encima de 0,35 son aceptables ya que se puede tener control del vehículo, valores de coeficiente por debajo de 0,25 resulta peligrosos. Observamos que el coeficiente de fricción del material 2 igual a 0,35 se da cuando la temperatura es de aproximadamente 600°C , para la misma temperatura el material 1 presenta un coeficiente de fricción de 0,46 aproximadamente, esto indica que el material 1 es más confiable que el material 2.

Una vez que se da el fading, dejando enfriar el sistema de frenos, este volverá a tener las mismas características anteriores, pero si se vuelve a abusar del sistema de frenos se producirá otras veces dicho efecto.

Análisis numérico de transferencia de calor. El análisis del modelo se realizó en el software Ansys Inc., importando las geometrías del software SolidWorks, en donde se obtuvieron los siguientes resultados de distribución de temperatura, flujo de calor y dirección del flujo.

Mediante la realización de este análisis térmico a los tres discos se puede observar con una visión más amplia el comportamiento de la distribución de temperatura, el flujo de calor y la dirección del flujo de los discos en toda su geometría, lo que es de gran interés en la investigación.

Teniendo en cuenta las condiciones iniciales de funcionamiento calculadas anteriormente y mediante programas de elementos finitos se pueden observar las zonas que más sufren estrés térmico durante la frenada. Este comportamiento lo podemos ver en la Tabla 35 en la que se simula la temperatura alcanzada en los discos ventilados.

Tabla 35. Distribución de temperaturas en los discos.

DISCO	D.1	D.2	D.3
Distribución de temperaturas			
	Porción		

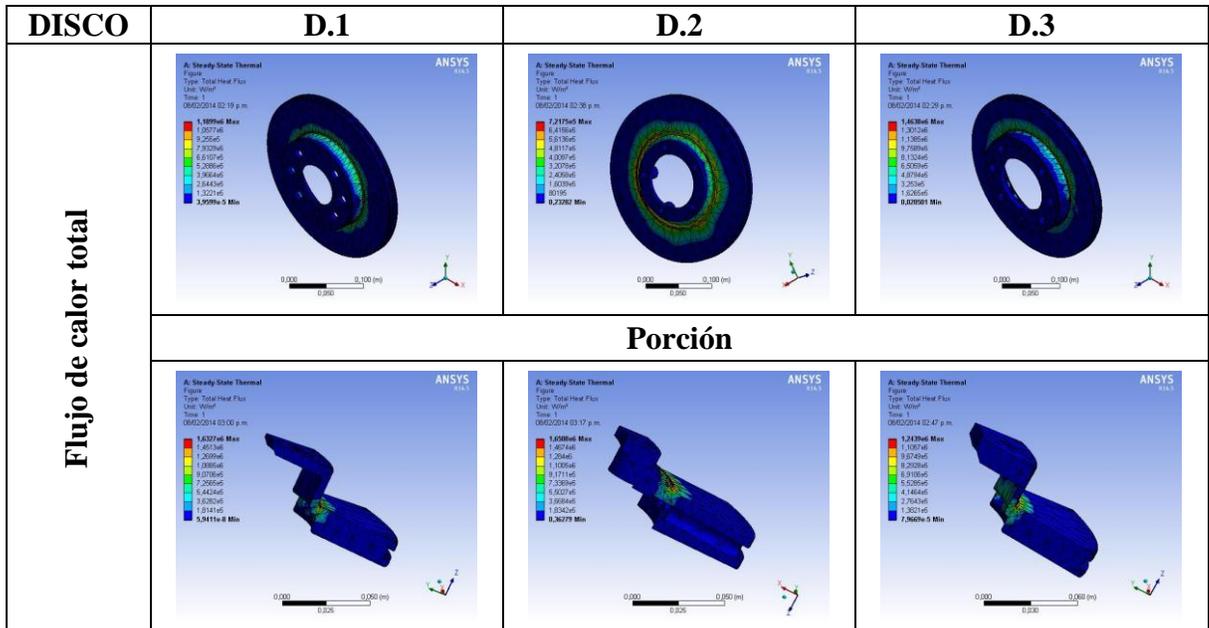
Fuente. Autor del proyecto de investigación.

En este caso, distribución de temperatura se hace máxima en el área de contacto con las pastillas de freno, en la tabla anterior se evidencia el comportamiento de la temperatura a través del disco, las temperaturas máximas alcanzadas fueron calculadas matemáticamente mediante transferencia de calor teniendo en cuenta variables como la masa del vehículo, velocidad de operación y el tipo de material del disco. Cálculos que fueron desarrollados en la sección anterior.

En cuanto al flujo de calor, este es máximo o total en el filtro térmico proceso de mecanizado por el cual son sometidos los discos para separar el área de contacto de la pastilla y reducir el calor que pasa hacia la campana y de esta manera evitar el calentamiento de la llanta, lo cual se evidencia en la Tabla 36.

En resumen de este análisis térmico que arrojo el software Ansys Inc., nos pudimos dar cuenta que las temperaturas que soportan estos discos son muy elevadas, y como consecuencia de ello es el cambio en las propiedades microestructurales del material, estos cambios hacen que el proceso de corrosión y demás propiedades se vean afectadas produciendo de esta manera que el factor de servicio de estos discos se vea reducido dependiendo del número de frenadas, el tiempo y tipo de exposición en los discos.

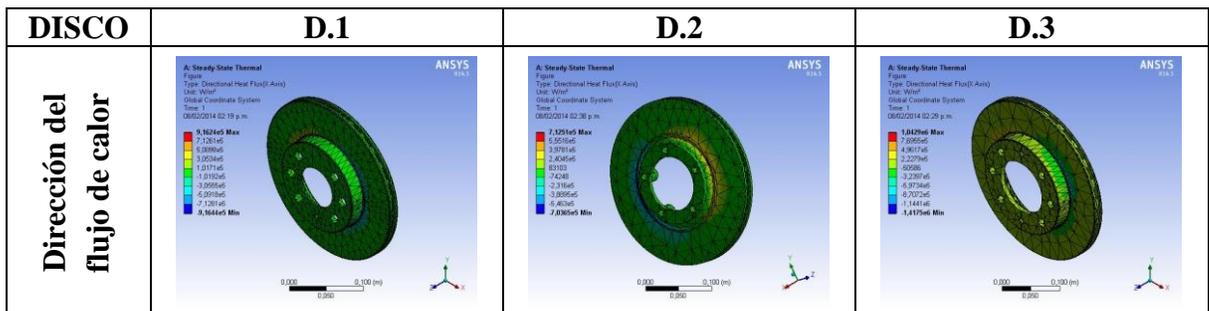
Tabla 36. Flujo de calor total en los discos.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

Simultáneamente la dirección del flujo de calor se genera en dirección axial en el eje x en donde se evacua la cantidad de calor generado por la fricción más eficientemente en cada uno de los discos.

Tabla 37. Dirección del flujo de calor en los discos.



Fuente. Autor del proyecto de investigación.

5. CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones que arrojó el análisis de los resultados matemáticos, experimentales y análisis numérico en los frenos de disco de los vehículos:

El sistema que fue considerado motivo de estudio y calculo, por parte del autor del proyecto fue el más factible, debido a que los elementos en consideración son de fácil acceso y hoy en día casi la totalidad de los vehículos poseen frenos de disco ventilados en las cuatro ruedas por su efectividad en el proceso de frenado; caso contrario ocurre en vehículos que se siguen utilizando los frenos de tambor en el eje trasero, en donde la mayoría de los inconvenientes proceden de la eficiencia del frenado ya que las zonas de generación de calor se encuentran cerradas, retardando de esta manera la evacuación de calor. El uso excesivo de los frenos, puede ocasionar la ebullición del líquido de frenos, causando la pérdida parcial o total del sistema.

Mediante el Software SolidWorks se llevó a cabo la realización de los planos y la geometría de los discos, aspecto considerado de gran importancia en el desarrollo del proyecto gracias a sus herramientas de simulación y dibujo especializado. De esta manera la importación de los planos al Software Ansys Inc. que fue de gran trascendencia para el análisis del efecto de la temperatura y las variables estáticas de los discos, en el que se aplicó un modelo teórico de transferencia de calor, dinámico, fluidos y maquinas hidráulicas. De igual manera se calculó matemáticamente la temperatura de contacto generada por la fricción entre el disco y las pastillas, el flujo de calor disipado por el disco de freno y la presión que debe ser ejercida en las pastillas de freno durante la operación de frenado. Además permitió demostrar y observar los fenómenos de las diferencias de temperaturas producidas sobre el disco, estas grandes temperaturas generadas en el proceso de frenado del vehículo pueden afectar el desempeño del sistema, produciendo la disminución en la presión ejercida, la concentración de tensiones sobre los discos y la cristalización de las pastillas.

Se comprobó gracias a las imágenes obtenidas en el microscopio, la microestructura y caracterización de las láminas de grafito que están presentes en los tres discos fabricados de este tipo de fundición gris, las cuales llevaron a la comparación y análisis bibliográfico de los resultados. Asimismo con la simulación en el Software SolidWorks y la realización del ensayo de compresión en la maquina universal, se pudieron observar los fenómenos estáticos tales como: esfuerzos, deformaciones y el factor de seguridad, a los cuales están sometidos los frenos de disco de los vehículos, además del deterioro en sus propiedades estructurales, las cuales se ven afectadas por la influencia de la aceleración de la corrosión.

La aceleración del proceso de corrosión en los frenos de disco se ve influenciado específicamente por los cambios térmicos a los cuales está expuesto el disco por la acción de la fricción entre las pastillas, la interacción con el medio al cual se encuentra expuesto, la utilización de un líquido para frenos con las características inadecuadas, además de la falta de mantenimiento de los componentes del sistema de frenado, lo que conduce a que las propiedades Físico-Mecánicas y estructurales del disco, se vean afectadas.

6. RECOMENDACIONES

Finalmente se presentan las sugerencias que se pueden tener en cuenta para este tipo de sistema de freno de disco de los vehículos:

La generación de la corrosión por los distintos factores de generación, obstruyen los canales de refrigeración produciendo de esta manera retardo en el proceso de transferencia o disipación de calor hacia el medio, este comportamiento afecta las propiedades Físico-Mecánicas del disco las cuales pueden ser mejoradas con la implementación de nuevas fundiciones o aleaciones, tales como recubrimientos cerámicos y metálicos o fundiciones de aluminio, titanio y cromo que se ha realizado en otras investigaciones, en donde la implementación de este tipo de materiales es muy costosa pero generan excelente desempeño en el proceso de frenado y debido a sus propiedades actúan como inhibidores en la aceleración del proceso de corrosión. Conjuntamente se puede evitar que el proceso de corrosión se vea acelerado, realizándole al material del que se fabriquen los discos de freno un tratamiento térmico, además de una protección anódica y catódica en la composición química de la fundición.

Los cálculos de generación y transferencia de calor, se realizaron con base en la velocidad máxima permitida en carretera de 80 Km/h, ya que no sería adecuado calcular a mayores velocidades, en donde se estiman las pérdidas por velocidad del aire y del material empleado. No obstante se podrían realizar estos cálculos a velocidades mayores las cuales producirán altas temperaturas, mas transferencia de calor y por consiguiente que las propiedades Físico-Mecánicas del material, se vean mayormente afectadas y ser motivo de análisis.

Es de gran importancia tener en cuenta la geometría del disco al momento de elegir el correcto sistema de frenado, que este sea capaz de disipar el calor generado por la fricción entre el disco y las pastillas más rápidamente, y asimismo se puedan evitar los grandes choques térmicos producidos en el sistema, los cuales afectan la estructura y demás propiedades del material. Además, es relevante mencionar que el líquido de freno posea una higroscopia lo suficientemente elevada para que sea capaz de absorber la humedad generada por la altas temperaturas. Igualmente se recomienda inspeccionar con frecuencia los componentes del sistema de frenado para que se garantice el correcto funcionamiento y mantenimiento, y en consecuencia de ello que las propiedades y características del material, no se afecten debido a la influencia de la aceleración del proceso de corrosión.

BIBLIOGRAFÍA

- ASHBY, Michael y Jones, Daniel.** Materiales para ingeniería, Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño. México: Reverte S.A. 2008. 912 p.
- ASM.** International Handbook ASM, Corrosion. Vol. 13. Handbook, 1992, 11 p.
- BILURBINA, Luis y Liesa, Francisco.** Fundamentos de corrosión y métodos de protección. Barcelona: UPC, 1996. 57 p.
- CENGEL, Yunus. A.** Transferencia de Calor, segunda edición. Bogotá, Colombia: McGraw Hill. 2004. 334-387 p.
- CRIADO, Elena.** Diseño y cálculo del sistema de frando para un prototipo formula student.. Leganes, España.: Universidad Carlos III de Madrid. 2012. p. 28-34.
- FONTANA, Mars.** Corrosion Engineering. Nueva York: McGraw-Hill, 1997. 457 p.
- GOLDIN, Jorge.** Curso Básico de Corrosión. Maturín, Venezuela: Centro Internacional de Entrenamiento y Desarrollo CIED, 1998. 78 p.
- HAUG, Tore y Rebstock, Kehl.** New material technologies for brakes. USA. Septiembre, 2009, vol. 4. Advanced brake technology.
- INCROPERA, Frank.** Fundamentos de transferencia de calor cuarta edición. México: Pearson. 1999. 284-351 p.
- IZQUIERDO, Francisco. A.** Teoría de los vehículos automóviles. Segunda Edición. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid. 2011. 122-161 p.
- MATAIX, Claudio.** Mecánica de fluidos y Máquinas Hidráulicas segunda edición. Madrid, España: Castillo S.A. 1996. 423-435 p.
- PERO SANZ, Jose.** Aceros: Metalurgia Física, Selección y Diseño. Madrid, España: Editoriales Dossat, 2000. 159 p.
- PIÑA, Manuel.** Estudio de la influencia de la morfología gráfica sobre las propiedades mecánicas de los discos de freno automotrices. Marzo, 2008. Science Direct, p. 125-128.
- PUHN, Fred.** Brake HandBook. USA: HP Books, 2000. 23-27 p.
- RILEY, Willian.** Ingeniería Mecánica Dinámica. México: Reverté S.A. 1996. 76-83 p.
- UHLIG'S, Herbert.** Corrosion Handbook 2^{da} Edición. Londres: RW. Revi, 2000. 94 p.

REFERENCIAS DOCUMENTALES ELECTRÓNICAS

ASTM. [En línea]. [<http://www.astm.org/>]. [Citado el 25 de Noviembre de 2013]. p 1-3.

BAGNOLI, Freddy. Thermal fatigue cracks of fire fighting vehicles gray iron brake discs. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 18 de Noviembre de 2013].p. 152–163.

BERGMAN, Fritz, Eriksson, Marcus y Jacobson, Roberta. A software based measurement system for test and analysis of automotive brake squeal. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 17 de Noviembre de 2013]. p 834-840.

BLAU, Petter y Jolly, Box. Tribological investigation of titanium-based materials for brakes. *Wear* 263. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 17 de Noviembre de 2013]. p. 1202-1211.

BLAU, Petter y Meyer III, Hiler. Characteristics of wear particles produced during friction tests of conventional and unconventional disc brakes materials. *Wear* 255. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 15 de Noviembre de 2013]. p. 1261–1269.

BLAU, Petter. Compositions, Functions, and Testing of Friction Brake Materials and Their Additives, Oak Ridge National Laboratory Technical Report ORNL/TM. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 18 de Noviembre de 2013]. p. 24-27.

CRISTOL BULTHE, Andru. Mechanical and chemical investigation of the temperature influence on the tribological mechanisms occurring in OMC/cast iron friction contact. *Wear* 264. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 17 de Noviembre de 2013]. p. 815–825.

ERIKSSON, Marcus. On the nature of tribological contact in automotive brakes. *Wear* 252. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 15 de Noviembre de 2013]. p. 26-36.

FILIP, Peter y Weiss, David. On friction layer formation in polymer matrix composite materials for brake applications. *Wear* 252. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 17 de Noviembre de 2013]. p. 189–198.

FINDIK, Fehin. Tribological properties of some phenolic composites suggested for automotive brakes. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 18 de Noviembre de 2013].p. 317–325.

JACOBSON, Roberta. Applications of a new model for the abrasive wear resistance of multiphase materials, composites and coated materials. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 17 de Noviembre de 2013]. p 1459-1463.

JACOBSON, Roberta. On the nature of tribological contact in automotive brakes. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 17 de Noviembre de 2013]. p. 156-161.

JANG, Hyun y Yoon, Jang. The effect of the composition and microstructure of gray cast iron on preferential wear during parasitic drag and on intrinsic damping capacity. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 17 de Noviembre de 2013]. p. 12-23.

KIM, Dhen., y Lee, Yong. Thermal stress analysis for a disc brake of a railway vehicles with consideration of the pressure distribution on a frictional surface. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 18 de Noviembre de 2013].p. 294-296.

MATEJKAA, Vaculik. Possible stibnite transformation at the friction surface of the semi-metallic friction composites designed for car brake linings. *Wear*. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 17 de Noviembre de 2013]. p. 26-36.

ROADHAUSE. "Manual técnico de la pastilla de freno (Discos de frenos)". [En línea]. [<http://www.imporbrake.com/manuales/Cap3.pdf>]. [Citado el 18 de Noviembre de 2013].p 10-35.

SHIN, Min y Cho, Khong. Friction Instability Induced by Corrosion of Gray Iron Brake Discs. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 17 de Noviembre de 2013]. p. 21-25.

SÖDERBERG, Alexander y Andersson, Sullivan. Simulation of wear and contact pressure distribution at the pad-to-rotor interface in a disc brake using general purpose finite element analysis software. *Wear* 267. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 15 de Noviembre de 2013]. p. 2243-2251.

TATSUYA, Kikuchi y Yasuhito Hara. Corrosion of Al–Sn–Bi alloys in alcohol at high temperatures. Part I: Effects of the metallurgical structure of the alloys and the metal salt additions to alcohol. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 17 de Noviembre de 2013]. p. 1482–1491.

TATSUYA, Kikuchi y Yasuhito Hara. Corrosion of Al–Sn–Bi alloys in alcohol at high temperatures. Part I: Effects of the metallurgical structure of the alloys and the metal salt additions to alcohol. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 17 de Noviembre de 2013].p. 1372–1331.

WAHLSTROM, Jens. A study of airborne wear particles from automotive disc brakes. The Royal Institute of Technology. [En línea]. [<http://www.sciencedirect.com/>]. [Citado el 15 de Noviembre de 2013]. p.1400 – 1179.

ANEXOS

ANEXO A. Propiedades de metales sólidos.

TABLA A-3											
Propiedades de metales sólidos (continuación)											
Composición	Punto de fusión, K	Propiedades a 300 K				Propiedades a varias temperaturas (K), k(W/m · K)/C _p (J/kg · K)					
		ρ kg/m ³	C _p J/kg · K	k W/m · K	α × 10 ⁶ m ² /s	100	200	400	600	800	1 000
AISI 1010		7 832	434	63.9	18.8			58.7	48.8	39.2	31.3
								487	559	685	1 168
Al carbono-silicio (Mn ≤ 1%, 0.1% < Si ≤ 0.6%)		7 817	446	51.9	14.9			49.8	44.0	37.4	29.3
								501	582	699	971
Al carbono-manganeso-silicio (1% < Mn ≤ 1.65% 0.1% < Si ≤ 0.6%)		8 131	434	41.0	11.6			42.2	39.7	35.0	27.6
								487	559	685	1 090
Aceros al cromo (bajo): ½ Cr-½ Mo-Si (0.18% C, 0.65% Cr, 0.23% Mo, 0.6% Si)		7 822	444	37.7	10.9			38.2	36.7	33.3	26.9
								492	575	688	969
1Cr-½ Mo (0.16% C, 1% Cr, 0.54% Mo, 0.39% Si)		7 858	442	42.3	12.2			42.0	39.1	34.5	27.4
								492	575	688	969
1Cr-V (0.2% C, 1.02% Cr, 0.15% V)		7 836	443	48.9	14.1			46.8	42.1	36.3	28.2
								492	575	688	969

ANEXO B. Propiedades del aire a la presión de 1 atmósfera.

TABLA A-15

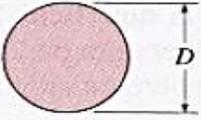
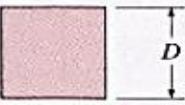
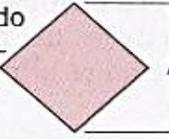
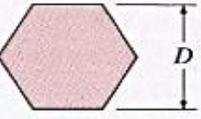
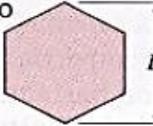
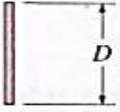
Propiedades del aire a la presión de 1 atm

Temp., T, °C	Densidad, ρ , kg/m ³	Calor específico, c_p , J/kg · K	Conductividad térmica, k, W/m · K	Difusividad térmica, α , m ² /s ²	Viscosidad dinámica, μ , kg/m · s	Viscosidad cinemática, ν , m ² /s	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1 002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1 004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1 005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1 006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1 007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1 033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1 044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1 056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1 069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1 081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1 093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1 115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1 135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1 153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1 169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1 000	0.2772	1 184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1 500	0.1990	1 234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2 000	0.1553	1 264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

ANEXO C. Número de Nusselt promedio para convección.

TABLA 7-1

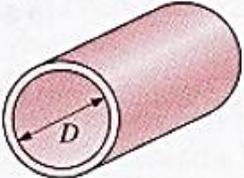
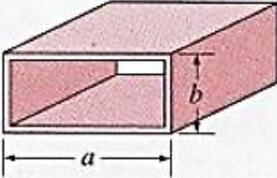
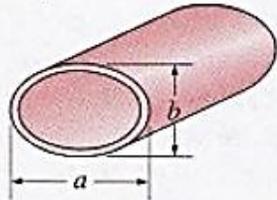
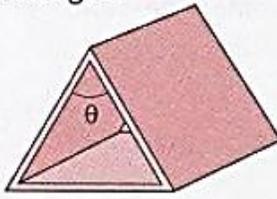
Correlaciones empíricas para el número de Nusselt promedio, para convección forzada sobre cilindros circulares y no circulares en flujo cruzado (tomado de Zukauskas, Ref. 14, y Jakob, 1949)

Sección transversal del cilindro	Fluido	Rango de Re	Número de Nusselt
<p>Círculo</p> 	Gas o líquido	0.4-4 4-40 40-4 000 4 000-40 000 40 000-400 000	$Nu = 0.989Re^{0.330} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.911Re^{0.385} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.683Re^{0.466} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.193Re^{0.618} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.027Re^{0.805} Pr^{1/3}$
<p>Cuadrado</p> 	Gas	5 000-100 000	$Nu = 0.102Re^{0.675} Pr^{1/3}$
<p>Cuadrado (inclinado 45°)</p> 	Gas	5 000-100 000	$Nu = 0.246Re^{0.588} Pr^{1/3}$
<p>Hexágono</p> 	Gas	5 000-100 000	$Nu = 0.153Re^{0.638} Pr^{1/3}$
<p>Hexágono (inclinado 45°)</p> 	Gas	5 000-19 500 19 500-100 000	$Nu = 0.160Re^{0.638} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.0385Re^{0.782} Pr^{1/3}$
<p>Placa vertical</p> 	Gas	4 000-15 000	$Nu = 0.228Re^{0.731} Pr^{1/3}$
<p>Elipse</p> 	Gas	2 500-15 000	$Nu = 0.248Re^{0.612} Pr^{1/3}$

ANEXO D. Número de Nusselt y factor de fricción para el flujo laminar.

TABLA 8-1

Número de Nusselt y factor de fricción para el flujo laminar completamente desarrollado en tubos de diversas secciones transversales ($D_h = 4A_c/p$, $Re = V_{prom}D_h/\nu$, y $Nu = hD_h/k$)

Configuración geométrica del tubo	a/b o θ°	Número de Nusselt		Factor de fricción f
		$T_s = \text{Const.}$	$\dot{q}_s = \text{Const.}$	
<p>Círculo</p> 	—	3.66	4.36	64.00/Re
<p>Rectángulo</p> 	a/b 1 2 3 4 6 8 ∞	2.98 3.39 3.96 4.44 5.14 5.60 7.54	3.61 4.12 4.79 5.33 6.05 6.49 8.24	56.92/Re 62.20/Re 68.36/Re 72.92/Re 78.80/Re 82.32/Re 96.00/Re
<p>Elipse</p> 	a/b 1 2 4 8 16	3.66 3.74 3.79 3.72 3.65	4.36 4.56 4.88 5.09 5.18	64.00/Re 67.28/Re 72.96/Re 76.60/Re 78.16/Re
<p>Triángulo</p> 	θ 10° 30° 60° 90° 120°	1.61 2.26 2.47 2.34 2.00	2.45 2.91 3.11 2.98 2.68	50.80/Re 52.28/Re 53.32/Re 52.60/Re 50.96/Re

ANEXO E. Norma ASTM 370.

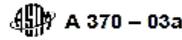


TABLE 3 Approximate Hardness Conversion Numbers for Non-austenitic Steels^A (Rockwell B to Other Hardness Numbers)

Rockwell B Scale, 100-kgf Load 1/16-in. (1.588-mm) Ball	Vickers Hardness Number	Brinell Hardness, 3000-kgf Load, 10-mm Ball	Knoop Hardness, 500-gf Load and Over	Rockwell A Scale, 60-kgf Load, Diamond Penetrator	Rockwell F Scale, 60-kgf Load, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	Rockwell Superficial Hardness			Approximate Tensile Strength ksi (MPa)
						15T Scale, 15-kgf Load, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	30T Scale, 30-kgf Load, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	45T Scale, 45-kgf Load, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	
100	240	240	251	61.5	...	93.1	83.1	72.9	116 (800)
99	234	234	246	60.9	...	92.8	82.5	71.9	114 (785)
98	228	228	241	60.2	...	92.5	81.8	70.9	109 (750)
97	222	222	236	59.5	...	92.1	81.1	69.9	104 (715)
96	216	216	231	58.9	...	91.8	80.4	68.9	102 (705)
95	210	210	226	58.3	...	91.5	79.8	67.9	100 (690)
94	205	205	221	57.6	...	91.2	79.1	66.9	98 (675)
93	200	200	216	57.0	...	90.8	78.4	65.9	94 (650)
92	195	195	211	56.4	...	90.5	77.8	64.8	92 (635)
91	190	190	206	55.8	...	90.2	77.1	63.8	90 (620)
90	185	185	201	55.2	...	89.9	76.4	62.8	89 (615)
89	180	180	196	54.6	...	89.5	75.8	61.8	88 (605)
88	176	176	192	54.0	...	89.2	75.1	60.8	86 (590)
87	172	172	188	53.4	...	88.9	74.4	59.8	84 (580)
86	169	169	184	52.8	...	88.6	73.8	58.8	83 (570)
85	165	165	180	52.3	...	88.2	73.1	57.8	82 (565)
84	162	162	176	51.7	...	87.9	72.4	56.8	81 (560)
83	159	159	173	51.1	...	87.6	71.8	55.8	80 (550)
82	156	156	170	50.6	...	87.3	71.1	54.8	77 (530)
81	153	153	167	50.0	...	86.9	70.4	53.8	73 (505)
80	150	150	164	49.5	...	86.6	69.7	52.8	72 (495)
79	147	147	161	48.9	...	86.3	69.1	51.8	70 (485)
78	144	144	158	48.4	...	86.0	68.4	50.8	69 (475)
77	141	141	155	47.9	...	85.6	67.7	49.8	68 (470)
76	139	139	152	47.3	...	85.3	67.1	48.8	67 (460)
75	137	137	150	46.8	89.6	85.0	66.4	47.8	66 (455)
74	135	135	147	46.3	89.1	84.7	65.7	46.8	65 (450)
73	132	132	145	45.8	88.5	84.3	65.1	45.8	64 (440)
72	130	130	143	45.3	88.0	84.0	64.4	44.8	63 (435)
71	127	127	141	44.8	87.4	83.7	63.7	43.8	62 (425)
70	125	125	139	44.3	86.8	83.4	63.1	42.8	61 (420)
69	123	123	137	43.8	86.2	83.0	62.4	41.8	60 (415)
68	121	121	135	43.3	85.6	82.7	61.7	40.8	59 (405)
67	119	119	133	42.8	85.1	82.4	61.0	39.8	58 (400)
66	117	117	131	42.3	84.5	82.1	60.4	38.7	57 (395)
65	116	116	129	41.8	83.9	81.8	59.7	37.7	56 (385)
64	114	114	127	41.4	83.4	81.4	59.0	36.7	...
63	112	112	125	40.9	82.8	81.1	58.4	35.7	...
62	110	110	124	40.4	82.2	80.8	57.7	34.7	...
61	108	108	122	40.0	81.7	80.5	57.0	33.7	...
60	107	107	120	39.5	81.1	80.1	56.4	32.7	...
59	106	106	118	39.0	80.5	79.8	55.7	31.7	...
58	104	104	117	38.6	80.0	79.5	55.0	30.7	...
57	103	103	115	38.1	79.4	79.2	54.4	29.7	...
56	101	101	114	37.7	78.8	78.8	53.7	28.7	...
55	100	100	112	37.2	78.2	78.5	53.0	27.7	...

ANEXO F. Norma ASTM E9.



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

Type of Jig	Ref	Thickness		Width		Length		Gage Length		
		in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm	
Montgomery-Templin:	(4 and 5)	General use	0.016 and over	0.40 and over	0.625	16.0	2.64	67.0	1	25
Magnesium alloys		0.016 and over	0.40 and over	0.750 ^B	20.0	2.64	67.0	1	25	
NACA (Kotanchik et al)	(6)	0.020 and over	0.50 and over	0.53	13.6	2.53	64.5	1	25	
Moore-McDonald	(7)	0.032 and over	0.80 and over	0.75 ^C	20.0	2.64	67.0	1	25	
LaTour-Wolford	(8)	0.010 to 0.020	0.25 to 0.50	0.50	12.5	1.95	49.5	1	25	
		0.020 and over	0.50 and over	0.50	12.5	2.00	51.0	1	25	
Miller	(9-11)	0.006 to 0.010	0.15 to 0.25	0.48	12.2	2.22	56.5	1	25	
		0.010 to 0.020	0.25 to 0.50	0.50	12.5	2.23	56.5	1	25	
		0.020 and over	0.50 and over	0.50	12.5	2.25	57.0	1	25	
Sandorff-Dillon:	(12)	General use	0.010 and over	0.25 and over	0.50	12.5	4.12	104.5	2	50
High-strength steel		0.010 and over	0.25 and over	0.50	12.5	3.10	78.5	2	50	

^A See Ref. (13) for additional jigs and specimen dimensions.
^B Reduced to 0.625 in. (16.0 mm) for 1.25 in. (30 mm) at the mid-length.
^C Reduced to 0.650 in. (16.5 mm) for 1.25 in. (30 mm) at the mid-length.



Designation: A 247 – 67 (Reapproved 1998)

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

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

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

1. Scope

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

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

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

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

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*

E 3 Methods of Preparation of Metallographic Specimens²

3. Summary of Test Method

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

4. Significance and Use

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

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

5. Test Specimens or Samples

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

6. Polishing

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

7. Classification of Graphite Form with Chart

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

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

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

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

Current edition effective Aug. 25, 1967. Originally issued 1941. Replaces A 247 – 47.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

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

⁴ Plates I, II, and III may be obtained from ASTM Headquarters. Order ADIA0247.

ANEXO H. Norma ASTM E18.



Designation: E18 – 08b

An American National Standard

Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials^{1, 2}

This standard is issued under the fixed designation E18; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

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

1. Scope*

1.1 These test methods cover the determination of the Rockwell hardness and the Rockwell superficial hardness of metallic materials by the Rockwell indentation hardness principle. This standard provides the requirements for Rockwell hardness machines and the procedures for performing Rockwell hardness tests.

1.2 This standard includes additional requirements in annexes:

Verification of Rockwell Hardness Testing Machines	Annex A1
Rockwell Hardness Standardizing Machines	Annex A2
Standardization of Rockwell Indenters	Annex A3
Standardization of Rockwell Hardness Test Blocks	Annex A4
Guidelines for Determining the Minimum Thickness of a Test Piece	Annex A5
Hardness Value Corrections When Testing on Convex Cylindrical Surfaces	Annex A6

1.3 This standard includes nonmandatory information in appendixes which relates to the Rockwell hardness test.

List of ASTM Standards Giving Hardness Values Corresponding to Tensile Strength	Appendix X1
Examples of Procedures for Determining Rockwell Hardness Uncertainty	Appendix X2

1.4 *Units*—At the time the Rockwell hardness test was developed, the force levels were specified in units of kilograms-force (kgf) and the indenter ball diameters were specified in units of inches (in.). This standard specifies the units of force and length in the International System of Units (SI); that is, force in Newtons (N) and length in millimeters (mm). However, because of the historical precedent and continued common usage, force values in kgf units and ball diameters in inch units are provided for information and much of the discussion in this standard refers to these units.

1.5 The test principles, testing procedures, and verification procedures are essentially identical for both the Rockwell and

Rockwell superficial hardness tests. The significant differences between the two tests are that the test forces are smaller for the Rockwell superficial test than for the Rockwell test. The same type and size indenters may be used for either test, depending on the scale being employed. Accordingly, throughout this standard, the term Rockwell will imply both Rockwell and Rockwell superficial unless stated otherwise.

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

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:³

- A370 Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products
- A623 Specification for Tin Mill Products, General Requirements
- A623M Specification for Tin Mill Products, General Requirements [Metric]
- B19 Specification for Cartridge Brass Sheet, Strip, Plate, Bar, and Disks
- B36/B36M Specification for Brass Plate, Sheet, Strip, and Rolled Bar
- B96/B96M Specification for Copper-Silicon Alloy Plate, Sheet, Strip, and Rolled Bar for General Purposes and Pressure Vessels
- B103/B103M Specification for Phosphor Bronze Plate, Sheet, Strip, and Rolled Bar
- B121/B121M Specification for Leaded Brass Plate, Sheet, Strip, and Rolled Bar
- B122/B122M Specification for Copper-Nickel-Tin Alloy, Copper-Nickel-Zinc Alloy (Nickel Silver), and Copper-Nickel Alloy Plate, Sheet, Strip, and Rolled Bar
- B130 Specification for Commercial Bronze Strip for Bullet Jackets
- B134/B134M Specification for Brass Wire

¹ These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee E28 on Mechanical Testing and are the direct responsibility of Subcommittee E28.06 on Indentation Hardness Testing.

Current edition approved Dec. 1, 2008. Published January 2009. Originally approved in 1932. Last previous edition approved in 2008 as E18 – 08a. DOI: 10.1520/E0018-08B.

² In this test method, the term Rockwell refers to an internationally recognized type of indentation hardness test as defined in Section 3, and not to the hardness testing equipment of a particular manufacturer.

³ For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

ANEXO I. Continuación de la Norma ASTM E18.



- B152/B152M Specification for Copper Sheet, Strip, Plate, and Rolled Bar
- B370 Specification for Copper Sheet and Strip for Building Construction
- E29 Practice for Using Significant Digits in Test Data to Determine Conformance with Specifications
- E92 Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials
- E140 Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness
- E384 Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials
- E691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method
- 2.2 *American Bearings Manufacturer Association Standard:*
 - ABMA 10-1989 Metal Balls⁴
- 2.3 *ISO Standards:*
 - ISO 6508-1 Metallic Materials—Rockwell Hardness Test—Part 1: Test Method (scales A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)⁵
 - ISO/IEC 17011 Conformity Assessment—General Requirements for Accreditation Bodies Accrediting Conformity Assessment Bodies⁶
 - ISO/IEC 17025 General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories⁷
- 2.4 *Society of Automotive Engineers (SAE) Standard:*
 - SAE J417 Hardness Tests and Hardness Number Conversions⁸

3. Terminology and Equations

3.1 Definitions:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3.2 Equations:

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

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

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

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

where:

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

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

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

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

where:

H_{max} = highest hardness value, and

H_{min} = lowest hardness value.

4. Significance and Use

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

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

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

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

⁵ Available from American National Standards Institute (ANSI), 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10036, <http://www.ansi.org>.

⁶ Available from Society of Automotive Engineers (SAE), 400 Commonwealth Dr., Warrendale, PA 15096-0001, <http://www.sae.org>.

ANEXO J. Resultados de la maquina universal para el Disco 1.

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Codigo	Fecha	Revisión
	RESULTADOS PRUEBAS DE LABORATORIO	F-AC-LRE-002	10-11-2011	A
	Dependencia	Aprobado		Pág.
LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES Y SISMICA	DIRECTOR DE DEPARTAMENTO		1(1)	

ENSAYO A COMPRESIÓN

Ensayo No.: 7311

Fecha: 12/02/2014

Cliente: Ricardo García León
 Obra: _____
 material: Fundición gris
 Descripción: _____
 Procedencia: _____

Número de la Muestra: Disco 1
 Fecha de muestreo: 12/02/2014
 Fecha recepción: 12/02/2014
 Slump (cm): _____

RESISTENCIA NOMINAL 100 Mpa Vel de ensayo 6 mm/min

No. De la Serie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dimensiones										
a (mm)	48,8									
b (mm)	19,6									
c (mm)	0									
Área (mm ²)	0 956		0 956							
Carga Máxima (kN)	329.96									
Resistencia Real (Mpa)	344,970									

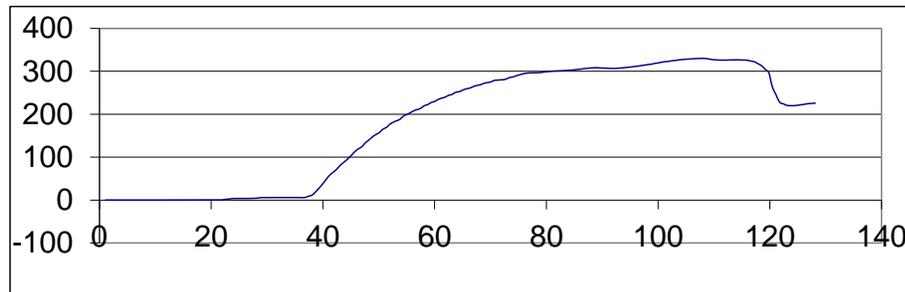


Gráfico de Esfuerzo Vs Tiempo

Observaciones: _____

Laboratorista: Iván Dario Bustos Arias

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

Máquina de ensayos: Pinzuar Ltda.

Rango: 1000 kN

No. se serie: 109

Calibración: 27/04/2012

Iván Dario Bustos A.



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



28/12/2010

ANEXO K. Resultados de la maquina universal para el Disco 2.

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Codigo	Fecha	Revision
	RESULTADOS PRUEBAS DE LABORATORIO	F-AC-LRE-002	10-11-2011	A
	Dependencia	Aprobado		Pág.
LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES Y SISMICA	DIRECTOR DE DEPARTAMENTO		1(1)	

ENSAYO A COMPRESIÓN

Ensayo No.: 7313

Fecha: 12/02/2014

Cliente: Ricardo García León
 Obra: _____
 material: Fundición gris
 Descripción: _____
 Procedencia: _____

Número de la Muestra: Disco 2
 Fecha de muestreo: 12/02/2014
 Fecha recepción: 12/02/2014
 Slump (cm): _____

RESISTENCIA NOMINAL 400 Mpa Vel de ensayo 6 mm/min

No. De la Serie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dimensiones										
a (mm)	30,5									
b (mm)	15,8									
c (mm)	0									
Area (mm ²)	0 482		0 482							
Carga Máxima (kN)	262,97									
Resistencia Real (Mpa)	545,702									

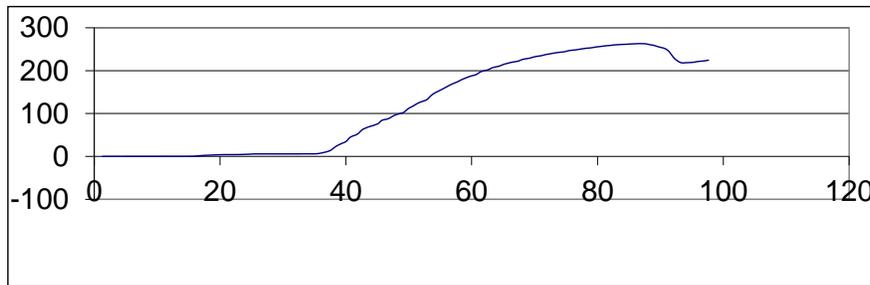


Gráfico de Esfuerzo Vs Tiempo

Observaciones: _____

Laboratorista: Iván Darío Bustos Arias	Jefe Laboratorio: Nelson Afanador G. I.C. Ms.C.
Máquina de ensayos: Pinzuar Ltda. Rango: 1000 kN	No. se serie: 109 Calibración: 27/04/2012



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



28/12/2010

ANEXO L. Resultados de la maquina universal para el Disco 3.

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Codigo	Fecha	Revisión
	RESULTADOS PRUEBAS DE LABORATORIO	F-AC-LRE-002	10-11-2011	A
	Dependencia	Aprobado		Pág.
LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES Y SISMICA	DIRECTOR DE DEPARTAMENTO		1(1)	

ENSAYO A COMPRESIÓN

Ensayo No.: 7312

Fecha: 12/02/2014

Cliente: Ricardo García León
 Obra: _____
 material: Fundición gris
 Descripción: _____
 Procedencia: _____

Número de la Muestra: Disco 3
 Fecha de muestreo: 12/02/2014
 Fecha recepción: 12/02/2014
 Slump (cm): _____

RESISTENCIA NOMINAL 400 Mpa Vel de ensayo 6 mm/min

No. De la Serie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dimensiones										
a (mm)	25									
b (mm)	19,5									
c (mm)	0									
Área (mm ²)	0 488		0 488							
Carga Máxima (kN)	170.49									
Resistencia Real (Mpa)	349,719									

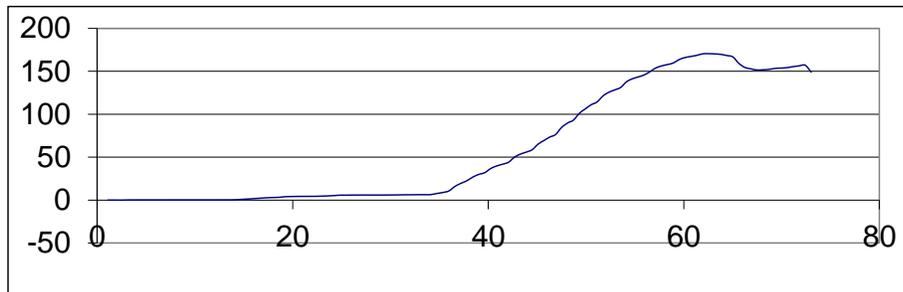


Gráfico de Esfuerzo Vs Tiempo

Observaciones: _____

Laboratorista: Iván Dario Bustos Arias

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

Máquina de ensayos: Pinzuar Ltda.

Rango: 1000 kN

No. se serie: 109

Calibración: 27/04/2012



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



28/12/2010

ANEXO M. Resultados de la maquina universal para la Disco Porción 1.

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Codigo	Fecha	Revision
	RESULTADOS PRUEBAS DE LABORATORIO	F-AC-LRE-002	10-11-2011	A
	Dependencia	Aprobado		Pág.
LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES Y SISMICA	DIRECTOR DE DEPARTAMENTO			1(1)

ENSAYO A COMPRESIÓN

Ensayo No.: 7314

Fecha: 12/02/2014

Cliente: Ricardo García León
Obra: _____
material: Fundición gris
Descripción: _____
Procedencia: _____

Número de la Muestra: Disco P1
Fecha de muestreo: 12/02/2014
Fecha recepción: 12/02/2014
Slump (cm): _____

RESISTENCIA NOMINAL 500 Mpa **Vel de ensayo** 6 mm/min

No. De la Serie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dimensiones										
a (mm)	9									
b (mm)	6,5									
c (mm)	0									
Area (mm ²)	0,059		0,059							
Carga Máxima (kN)	25,28									
Resistencia Real (Mpa)	432,178									

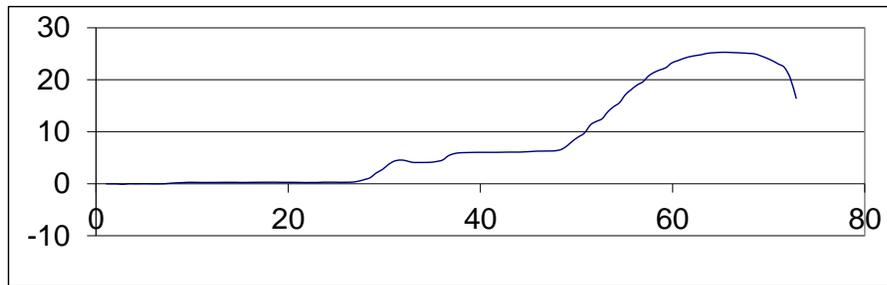


Gráfico de Esfuerzo Vs Tiempo

Observaciones: _____

Laboratorista: Iván Darío Bustos Arias	Jefe Laboratorio: Nelson Afanador G. I.C. Ms.C.
Máquina de ensayos: Pinzuar Ltda. Rango: 1000 kN	No. se serie: 109 Calibración: 27/04/2012



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



28/12/2010

ANEXO N. Resultados de la maquina universal para la Disco Porción 2.

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Codigo	Fecha	Revision
	RESULTADOS PRUEBAS DE LABORATORIO	F-AC-LRE-002	10-11-2011	A
Dependencia	Aprobado		Pag.	
LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES Y SISMICA	DIRECTOR DE DEPARTAMENTO		1(1)	

ENSAYO A COMPRESIÓN

Ensayo No.: 7316

Fecha: 12/02/2014

Cliente: Ricardo García León
 Obra: _____
 material: Fundición gris
 Descripción: _____
 Procedencia: _____

Número de la Muestra: Disco P2
 Fecha de muestreo: 12/02/2014
 Fecha recepción: 12/02/2014
 Slump (cm): _____

RESISTENCIA NOMINAL 400 Mpa Vel de ensayo 6 mm/min

No. De la Serie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dimensiones										
a (mm)	13									
b (mm)	6,5									
c (mm)	0									
Área (mm ²)	0,085		0,085							
Carga Máxima (kN)	20,08									
Resistencia Real (Mpa)	237,672									

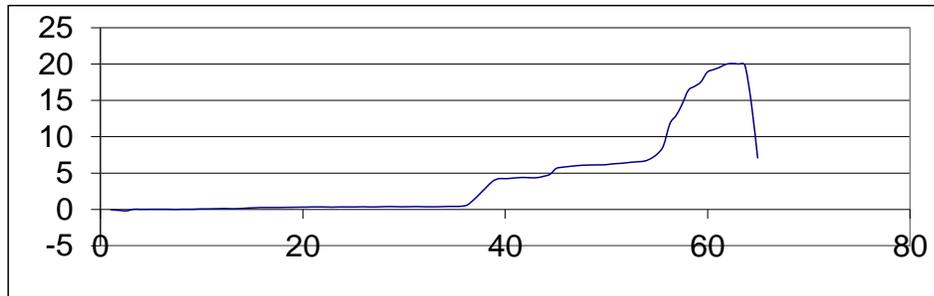


Gráfico de Esfuerzo Vs Tiempo

Observaciones: _____

Laboratorista: <u>Iván Dario Bustos Arias</u>	Jefe Laboratorio: <u>Nelson Afanador G. I.C. Ms.C.</u>
Máquina de ensayos: <u>Pinzuar Ltda.</u>	Rango: <u>1000 kN</u> No. se serie: <u>109</u> Calibración: <u>27/04/2012</u>

Iván Dario Bustos A.



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



28/12/2010

ANEXO O. Resultados de la maquina universal para la Disco Porción 3.

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Codigo	Fecha	Revision
	RESULTADOS PRUEBAS DE LABORATORIO	F-AC-LRE-002	10-11-2011	A
	Dependencia	Aprobado		Pág.
LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES Y SISMICA	DIRECTOR DE DEPARTAMENTO		1(1)	

ENSAYO A COMPRESIÓN

Ensayo No.: 7315

Fecha: 12/02/2014

Cliente: Ricardo García León
 Obra: _____
 material: Fundición gris
 Descripción: _____
 Procedencia: _____

Número de la Muestra: Disco P3
 Fecha de muestreo: 12/02/2014
 Fecha recepción: 12/02/2014
 Slump (cm): _____

RESISTENCIA NOMINAL 400 Mpa Vel de ensayo 6 mm/min

No. De la Serie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dimensiones										
a (mm)	9									
b (mm)	5,2									
c (mm)	0									
Area (mm ²)	0 047		0 047							
Carga Máxima (kN)	16,20									
Resistencia Real (Mpa)	346,112									

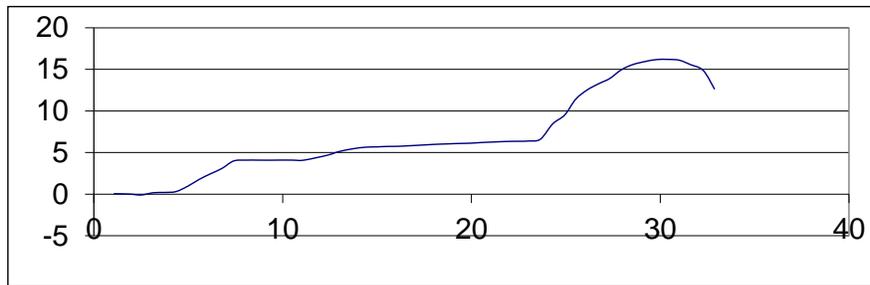


Gráfico de Esfuerzo Vs Tiempo

Observaciones: _____

Laboratorista: Iván Darío Bustos Arias	Jefe Laboratorio: Nelson Afanador G. I.C. Ms.C.
Máquina de ensayos: Pinzuar Ltda. Rango: 1000 kN	No. se serie: 109 Calibración: 27/04/2012

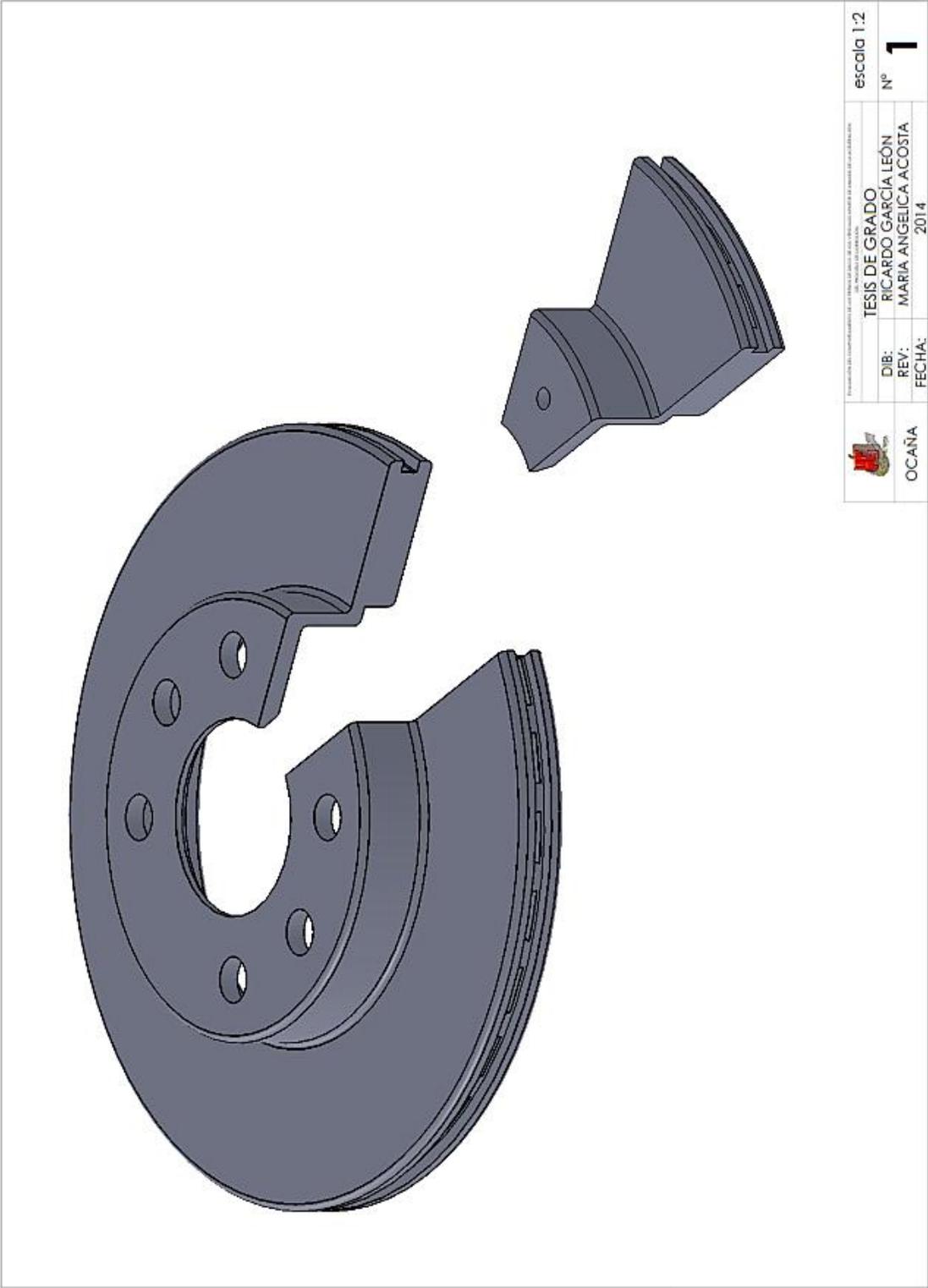


VÍA ACOLSURE, SEDE EL ALGODONAL, OCAÑA N. DE S.
 Línea Gratuita Nacional 018000 121022 / PBX: 097-5690088
 www.ufps.edu.co



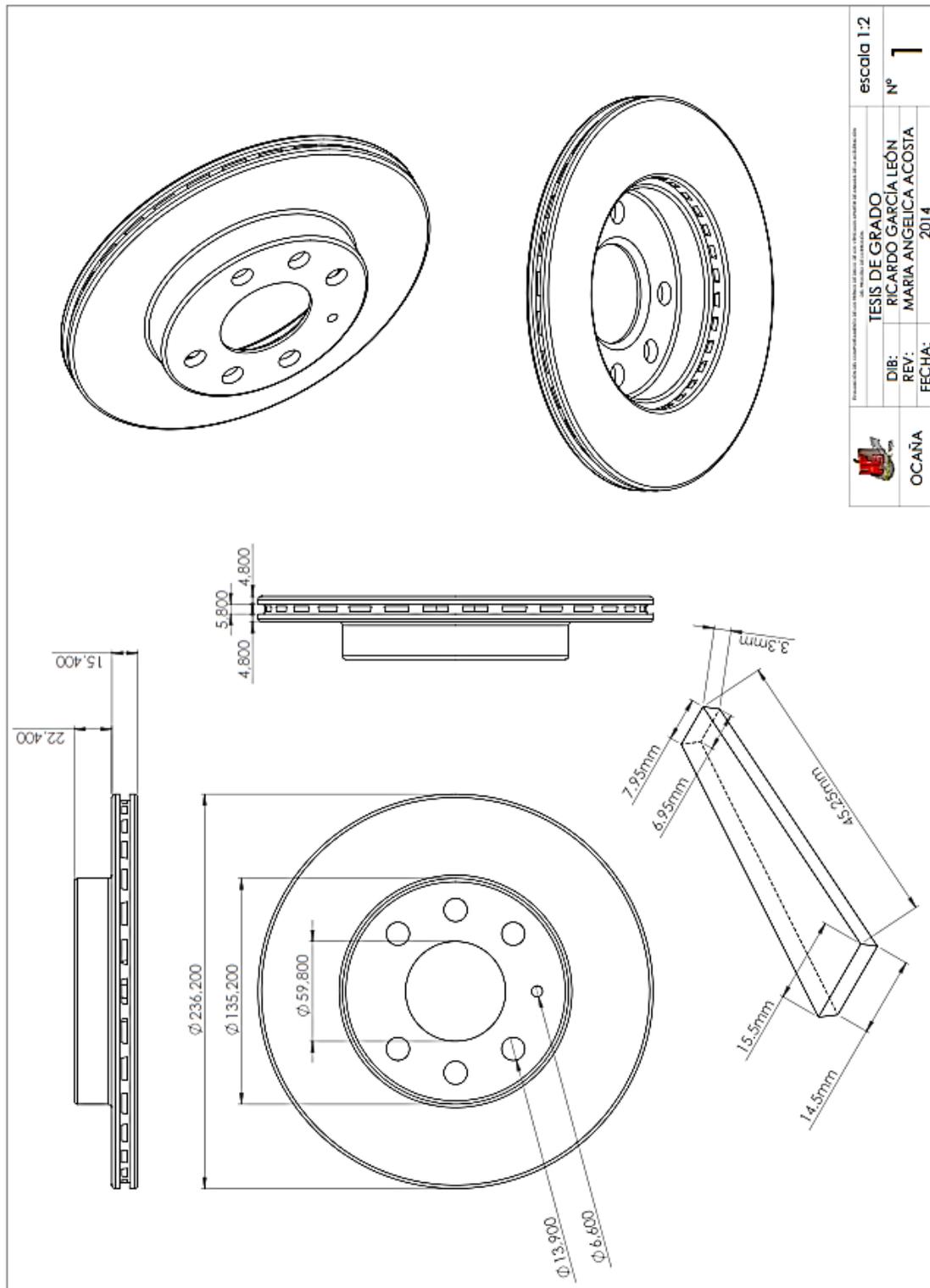
28/12/2010

ANEXO P. Geometría del disco 1.

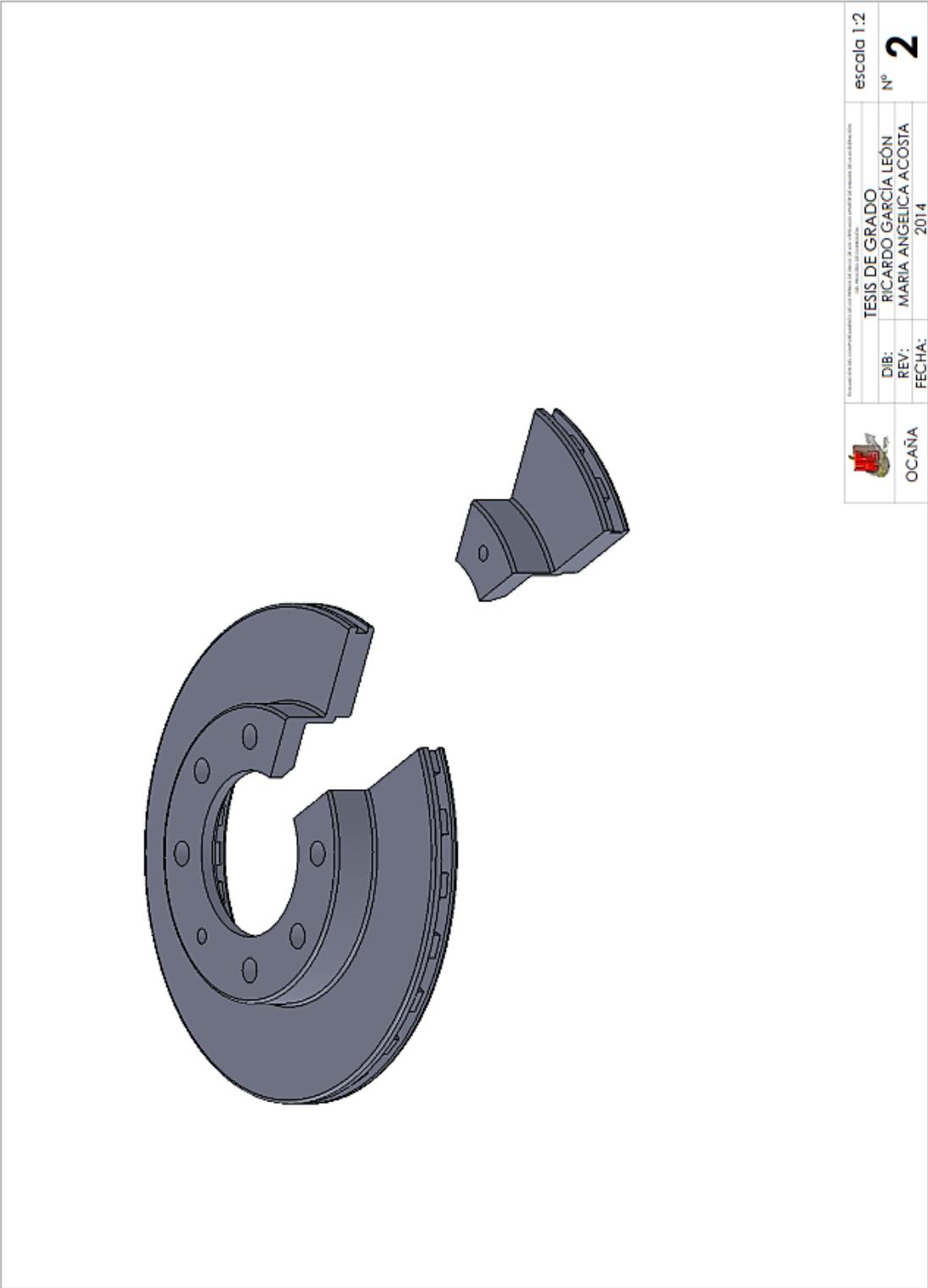


	escala 1:2
OCANA	Nº 1
	TESIS DE GRADO
	DIB: RICARDO GARCÍA LEÓN
	REV: MARIA ANGELICA ACOSTA
	FECHA: 2014

ANEXO Q. Planos del disco 1.

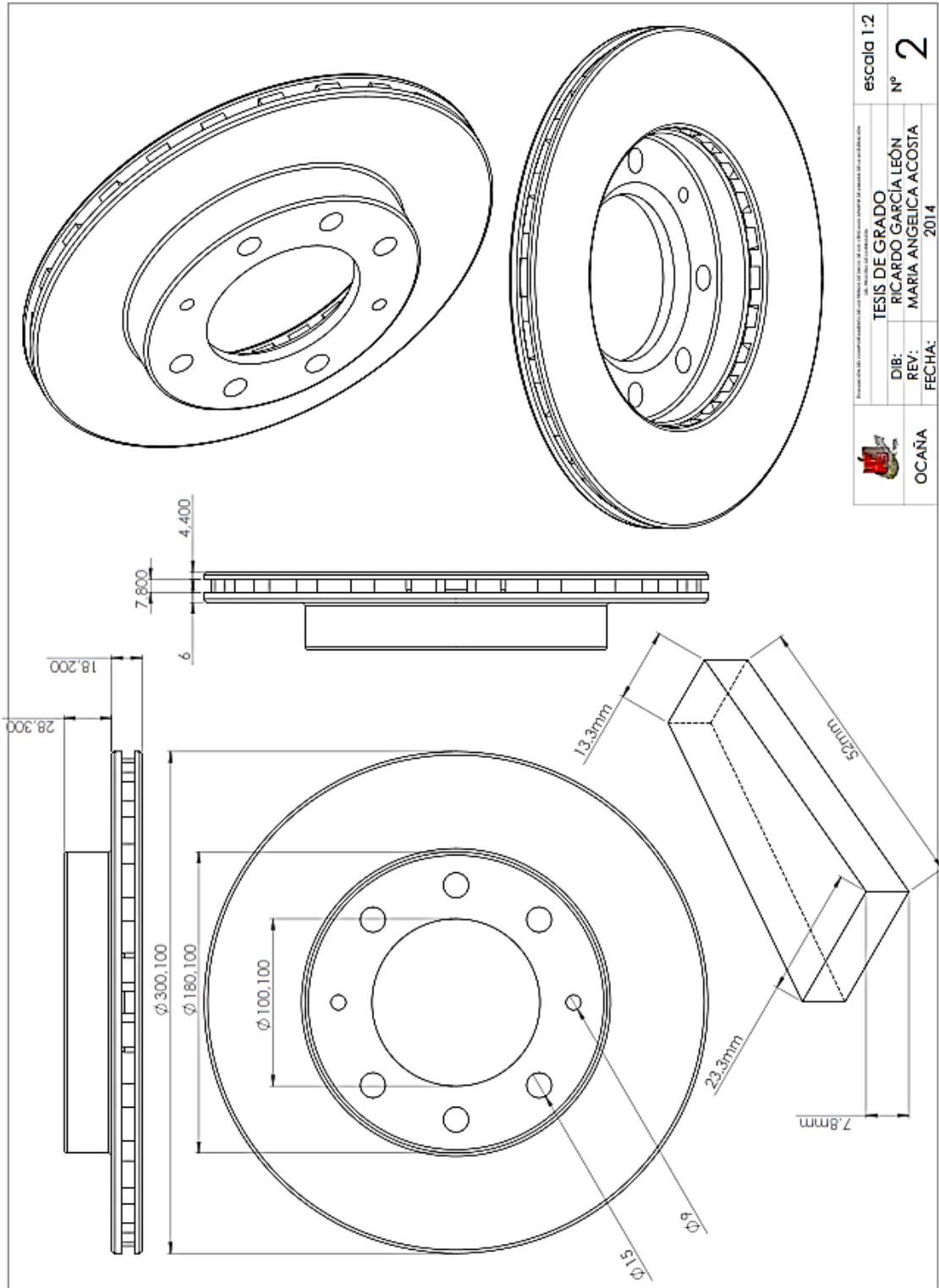


ANEXO R. Geometría del disco 2.

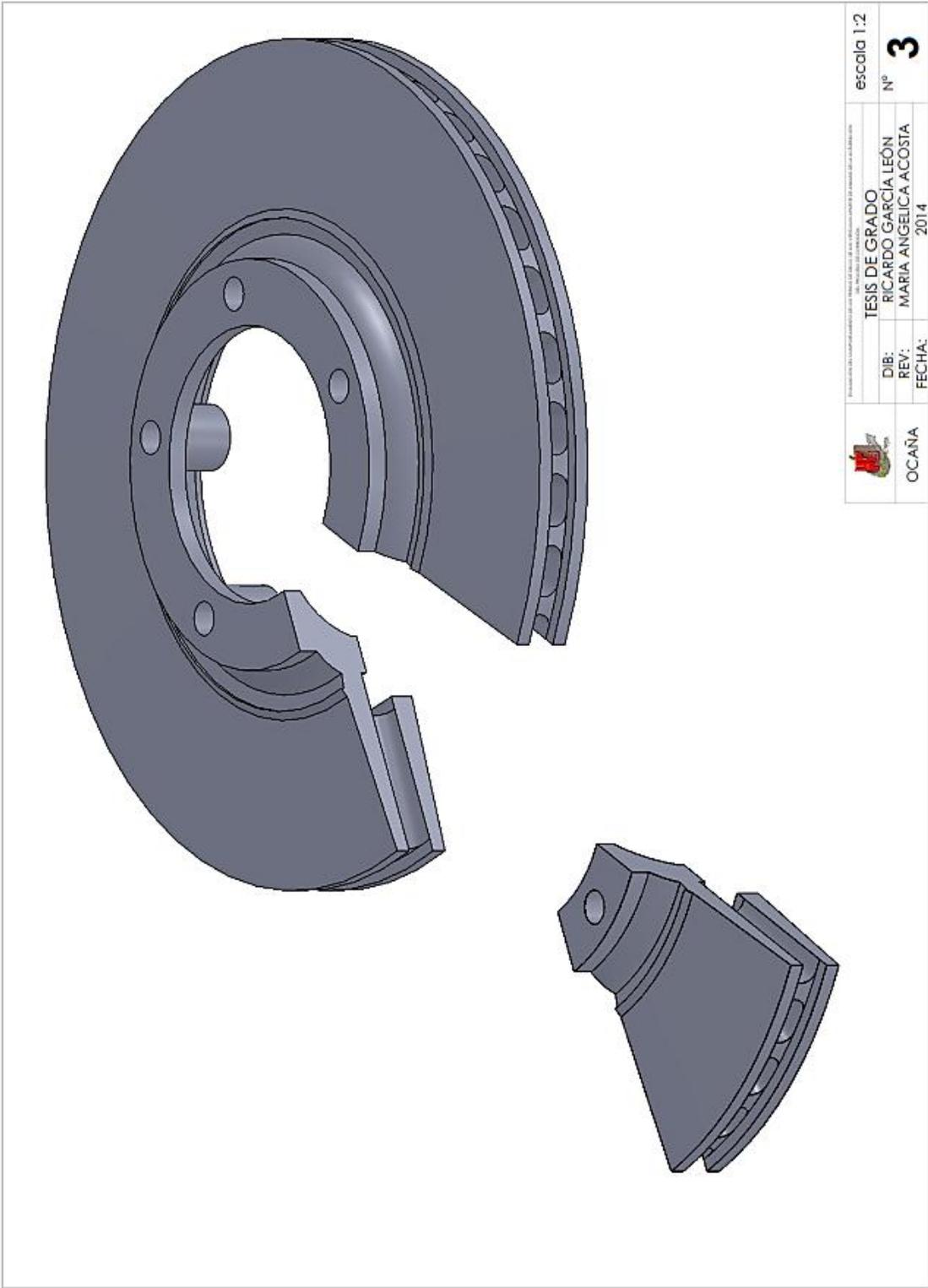


	OCAYA	
	escala 1:2	
TESIS DE GRADO		Nº
DIB: RICARDO GARCIA LEÓN		2
REV: MARIA ANGELICA ACOSTA		
FECHA: 2014		

ANEXO S. Planos del disco 2.



ANEXO T. Geometría del disco 3.



ANEXO U. Planos del disco 3.

