



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**“ANÁLISIS COMPARATIVO DE UN DISCO DE FRENO
ORIGINAL FRENTE A UN ALTERNO PARA UN
VEHÍCULO CHEVROLET AVEO MEDIANTE
SIMULACIÓN Y PRUEBAS EXPERIMENTALES.”**

LOAYZA SIGCHO WILLAN ANDRÉS

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO AUTOMOTRIZ

**RIOBAMBA – ECUADOR
2017**

APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

2016-10-20

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparado por:

LOAYZA SIGCHO WILLAN ANDRÉS

Titulado:

**“ANÁLISIS COMPARATIVO DE UN DISCO DE FRENO ORIGINAL FRENTE
A UN ALTERNO PARA UN VEHÍCULO CHEVROLET AVEO MEDIANTE
SIMULACIÓN Y PRUEBAS EXPERIMENTALES.”**

Sea aceptado como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO AUTOMOTRIZ

Ing. Carlos Santillán Mariño
DECANO FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Freddy Colcha Guashpa
DIRECTOR

Ing. Edwin Pozo Safla
ASESOR

EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: LOAYZA SIGCHO WILLAN ANDRÉS

TRABAJO DE TITULACIÓN: “ANÁLISIS COMPARATIVO DE UN DISCO DE FRENO ORIGINAL FRENTE A UN ALTERNO PARA UN VEHÍCULO CHEVROLET AVEO MEDIANTE SIMULACIÓN Y PRUEBAS EXPERIMENTALES.”

Fecha de Examinación: 2017-02-09

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. José Pérez Fiallos PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Freddy Colcha Guashpa DIRECTOR			
Ing. Edwin Pozo Safla ASESOR			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. José Pérez Fiallos
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

DERECHOS DE AUTORÍA

El trabajo de titulación que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teórico-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad del autor. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Loayza Sigcho Willan Andrés

DECLARACION DE AUTENTICIDAD

Yo, Willan Andrés Loayza Sigcho, declaro que el presente Trabajo de Titulación es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

Loayza Sigcho Willan Andrés
Cédula de Identidad: 070624426-6

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo primero a Dios que me brindo la sabiduría y ciencia suficiente para alcanzar mis objetivos. A mis padres que durante el transcurso de la etapa estudiantil siempre me brindaron su apoyo incondicional, confianza y sus sabios consejos para que siga adelante a pesar de los obstáculos presentados.

A todos los miembros de mi familia y amigos que siempre estuvieron a mi lado apoyándome de diferentes maneras para que pueda cumplir mis metas.

Willan Andrés Loayza Sigcho

AGRADECIMIENTO

El agradecimiento eterno a Dios por permitirme cumplir una meta más en la vida y por brindarme salud durante todo este tiempo. A mis padres que con su ejemplo, educación y sacrificio me dieron el apoyo que necesitaba para salir adelante.

A la Escuela de Ingeniería Automotriz por brindarme la oportunidad de obtener una gran profesión, a cada uno de los profesores que día a día supieron expresar sus conocimientos y experiencias para adquirir una formación de calidad.

A mi director y asesor de tesis, que gracias a sus consejos, opiniones y disposición en todo momento se logró culminar con este trabajo.

Y en especial para mis tías que me apoyaron no solo durante la vida universitaria sino en todo momento que lo necesitaba.

Willan Andrés Loayza Sigcho

CONTENIDO

Pág.

1. INTRODUCCIÓN	
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación	2
1.3 Objetivos	2
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	2
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	2
1.4 Hipótesis	3
1.4.1 <i>Hipótesis nula</i>	3
1.4.2 <i>Hipótesis alternativa</i>	3
2. MARCO TEÓRICO	
2.1 Sistema de frenos del automóvil	4
2.1.1 <i>El pedal de freno</i>	4
2.1.2 <i>Servofreno</i>	4
2.1.3 <i>Bomba de freno</i>	5
2.1.4 <i>Líquido de frenos</i>	5
2.1.5 <i>Discos y tambores</i>	6
2.2 Sistema de frenos en las ruedas	6
2.2.1 <i>Frenos de tambor</i>	6
2.2.2 <i>Frenos de disco</i>	7
2.2.3 <i>Problemas en los discos de frenos</i>	10
2.2.4 <i>Material de los discos de freno</i>	12
2.3 Métodos espectrométricos	14
2.3.1 <i>Espectrometría</i>	14
2.4 Ensayo de dureza	15
2.4.1 <i>Densidad</i>	16
2.5 Ensayo de tracción	16
2.5.1 <i>Resistencia a la tracción</i>	17
2.5.2 <i>Esfuerzo de tensión</i>	17
2.5.3 <i>Módulo de elasticidad</i>	17
2.5.4 <i>Coefficiente de Poisson</i>	17
2.5.5 <i>Módulo de corte</i>	18
2.6 Desgaste de los discos de freno	18
2.6.1 <i>Tribología</i>	18
2.6.2 <i>Fricción</i>	18
2.6.3 <i>Desgaste</i>	19
2.7 Método de elementos finitos	19
2.7.1 <i>Análisis por M.E.F.</i>	19
2.7.2 <i>Ansys</i>	22
2.7.3 <i>Análisis térmico con Ansys</i>	22
2.7.4 <i>Etapas del análisis</i>	23

3.	DATOS GENERALES Y PRUEBAS EXPERIMENTALES	
3.1	Selección de automóvil para el análisis de discos de freno.....	24
3.2	Problemas más comunes en los discos y pastillas de freno.....	26
3.3	Pruebas experimentales.....	29
3.3.1	<i>Espectrometría</i>	29
3.3.2	<i>Ensayo metalográfico</i>	32
3.3.3	<i>Ensayo de tracción</i>	35
3.3.4	<i>Prueba de dureza</i>	36
3.3.5	<i>Ensayo de desgaste</i>	38
3.3.6	Análisis por el método de elementos finitos	39
4.	ANÁLISIS COMPARATIVO	
4.1	Espectrometría.....	51
4.2	Metalografía.....	52
4.3	Dureza.....	54
4.4	Ensayo de tracción.....	54
4.5	Clasificación de la fundición gris.....	55
4.6	Desgaste.....	56
4.7	Simulación.....	57
5.	PRUEBA DE HIPÓTESIS	
5.1	Hipótesis.....	59
5.2	Nivel de significancia.....	59
5.3	Estadístico de prueba	59
5.3.1	<i>Normalidad</i>	59
5.3.2	<i>Igualdad de varianza</i>	60
5.3.3	<i>Cálculo de t valor</i>	60
5.3.4	<i>Cálculo de P valor</i>	61
5.4	Toma de decisión.....	61
5.5	Análisis estadístico ensayo de desgaste.....	61
5.6	Análisis estadístico de la dureza.....	63
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
6.1	Conclusiones.....	66
6.2	Recomendaciones.....	67

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

LISTA DE TABLAS

	Pág.
1	Propiedades discos..... 10
2	Resultados análisis por espectrometría..... 31
3	Resultados ensayo de tracción..... 36
4	Dureza Brinell 37
5	Resultados prueba de desgaste 39
6	Masa de discos de freno 42
7	Volumen de discos de freno 42
8	Valores resistencia a la tracción 43
9	Propiedades disco original..... 43
10	Propiedades disco alternativo 43
11	Propiedades pastillas de freno 44
12	Esfuerzos en el disco original..... 49
13	Esfuerzos disco alternativo..... 49
14	Temperatura disco original..... 50
15	Temperaturas disco alternativo..... 50
16	Composición química de la fundición gris 55
17	Comparación propiedades de fundición gris. 55
18	Composición química de la fundición gris 56
19	Comparación propiedades de fundición gris. 56
20	Desgaste discos de freno 57
21	Desgaste pastillas de freno 57
22	Resultados simulación 58
23	Distribución t student 60
24	Normalidad de variable 61
25	Igualdad de varianza..... 62
26	Valores distribución t student..... 62
27	Normalidad de variables..... 64
28	Igualdad de varianza..... 64
29	Valores distribución t student..... 64
30	Datos iniciales 79
31	Equivalencia material según normas 81

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1	Pedal de freno 4
2	Servofreno..... 5
3	Bomba de freno..... 5
4	Líquido de frenos 6
5	Frenos de tambor 6
6	Frenos de disco 7
7	Pastillas de freno 8
8	Disco de freno 9
9	Defectos de los discos de freno..... 10
10	Disco agrietado 11
11	Fisuras en el disco 11
12	Sobrecalentamiento del disco de freno 12
13	Microestructura perlítico-ferrítico 13
14	Microestructura perlítica..... 14
15	Esquema máquina universal 16
16	Fricción 19
17	Discretización 20
18	Elementos discretos 20
19	Diseño en Ansys 22
20	Vehículos matriculados según marcas..... 24
21	Automóviles matriculados según marcas. 25
22	Discos y pastillas de freno alterno y original..... 25
23	Preferencia pastillas de freno 26
24	Preferencia discos de freno 27
25	Problemas en pastillas de freno 27
26	Problemas en discos de freno..... 28
27	Sierra eléctrica 29
28	Sierra de cinta 30
29	Probetas alterna y original 30
30	Espectrómetro por chispa..... 31
31	Máquina de lijado 32
32	Máquina de pulido 32
33	Microestructura disco original 33
34	Microestructura disco alterno 34
35	Mecanizado probetas 35
36	Durómetro 36
37	Microscopio 37
38	Bando de pruebas..... 38
39	Probetas ensayo desgaste 38
40	Dimensiones brazo pedal de freno..... 39
41	Principio de Pascal..... 40
42	Ensamble disco y pastillas 44

43	Comandos	45
44	Regiones de contacto 1	46
45	Regiones de contacto 2	46
46	Mallado	46
47	Configuración de análisis.....	47
48	Condiciones principales.....	47
49	Resultados de simulación.....	48
50	Comparación matriz.....	53
51	Normalidad	61
52	Igualdad de varianzas.....	62
53	Distribución t dos colas.....	63
54	Normalidad	63
55	Igualdad de varianzas.....	64
56	Distribución t dos colas.....	65
57	Montaje disco de freno	71
58	Primer corte.....	72
59	Montaje de probeta	72
60	Limpieza muestras	74
61	Cámara de chispeo	74
62	Máquina de lijado	76
63	Máquina para pulido	76
64	Microscopio	77
65	Montaje probeta	78
66	Probeta despues del ensayo.....	78
67	Montaje disco y pastillas.....	79
68	Accionamiento sistema de frenos	80
69	Medición de espesor	80

LISTA DE ABREVIACIONES

CAE	Ingeniería asistida por ordenador
ASTM	Asociación Americana de Ensayo de Materiales
HB	Dureza Brinell
MEF	Método de Elementos Finitos
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos
P-A	Probeta disco original
P-B	Probeta disco alterno
NTE	Norma Técnica Ecuatoriana
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
GDL	Grados de Libertad

LISTA DE ANEXOS

- A Proceso de obtención probetas para espectrometría
- B Procedimiento espectrometría
- C Procedimiento prueba metalográfica
- D Procedimiento ensayo de tracción
- E Procedimiento prueba de desgaste
- F Equivalencia de la fundición gris según normas
- G Formato encuestas

RESUMEN

Al realizar un análisis comparativo de los discos de freno original frente a un alterno, mediante pruebas experimentales y simulación por el método de los elementos finitos con ayuda de software CAE, se establecerán sus particularidades con la obtención de datos en los ensayos. De esta manera se pretende ayudar a la sociedad que no tiene conocimiento apropiado para adquirir repuestos de este tipo con información de las características, propiedades de cada uno. Se desarrolló los ensayos experimentales para analizar las propiedades y la estructura interna que presentan los discos, tomando como referencia normas INEN y ASTM para la obtención de resultados precisos y correctos. Para el ensayo de desgaste se reparó un banco de pruebas del colegio técnico Daniel Córdova Toral en la ciudad de Cuenca, las probetas utilizadas fueron los mismos discos y pastillas adquiridos y se efectuó las respectivas mediciones en un intervalo de tiempo establecido para el análisis de datos. En la simulación se utiliza un análisis transitorio mediante el software Ansys, diseñando tanto disco como pastilla en SolidWorks, se definió las propiedades del material de cada uno que permiten diferenciar los discos originales de los alternos, y se estableció las condiciones de estudio para realizar la simulación encontrando de esta manera los posibles esfuerzos y temperaturas que pueden alcanzar. Los discos de freno originales son más apropiados para su uso en el vehículo debido a que presentan mejores características mecánicas que los discos alternos. Se recomienda desarrollar un análisis térmico de cada material, con diferentes grados de temperatura y modos de enfriamiento para conocer el comportamiento bajo estas exigencias.

PALABRAS CLAVE: <ANÁLISIS COMPARATIVO>, <DISCO ORIGINAL>, <DISCO ALTERNO>, <PRUEBAS EXPERIMENTALES>, <SIMULACIÓN>, <INGENIERÍA ASISTIDA POR COMPUTADORA (CAE)>, <INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN (INEN)>, <ASOCIACIÓN AMERICANA DE ENSAYO DE MATERIALES (ASTM)>.

SUMMARY

When we carry out a comparative analysis of the original brake discs versus an alternator one, by means of experimental tests and simulation by the finite element method using CAE software, its particularities will be established with the obtaining of data in the tests. In this way, it is intended to help to the society that does not have the appropriate knowledge in order to acquire spare parts of this type with information of the characteristics, properties of each one. Experimental tests were developed in order to analyze the properties and internal structure that the discs show; taking accounts as a reference the norms INEN and ASTM for obtaining accurate and correct results. For the essay reduction, a bank of tests of the technical high school Daniel Cordova Toral was repaired in the city of Cuenca, the test pieces used were the same discs and pads acquired and the respective measurements were carried out within a time interval established for the analysis of the data. In the simulation we use a transient analysis through the Ansys software, designed both disc and pad in SolidWorks, the properties of the material of each one were defined that allow to differentiate the original discs from the alternate ones, and the conditions of study were established in order to realize the simulation finding in this way the possible efforts and temperatures that can reach. The original brake discs are more appropriate for the use in the vehicle because they have better mechanical characteristics than the alternating discs. It is recommended to develop a thermal analysis of each material, with different degrees of temperature and cooling modes in order to know the results under these demands.

KEY WORDS: <COMPARATIVE ANALYSIS>, <ORIGINAL DISC>, <ALTERNATE DISC>, <EXPERIMENTAL TESTS>, <SIMULATION>, <ASSITED ENGINEERING BY COMPUTER>, <ECUADORIAN INSTITUTE OF STANDARDIZATION (INEN)>, <AMERICAN ASSOCIATION OF TEST MATERIAL>.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Todo automotor construido desde épocas antiguas hasta los mejorados vehículos de última generación, necesitan de un sistema que permita detenerlos completa o parcialmente por medio de una acción generada por parte del conductor, especialmente para evitar los posibles accidentes que se puedan suscitar durante el manejo.

Por tal razón se han diseñado dos tipos de frenos, los sistemas de disco y de tambor, en donde los elementos principales son los discos y pastillas para el primer caso y el tambor junto con las zapatas para el segundo. El sistema de discos de freno viene constituyéndose en el diseño más usado no solo en el eje delantero sino también dispuesto ya en el eje posterior de algunos vehículos ya que permite una disipación de calor mayor.

Algunas empresas alrededor del mundo se centran en analizar los discos y pastillas de freno para los vehículos, de esta manera llegan a diseñar nuevos modelos con mejores propiedades y características que los ya existentes en el mercado, desarrollando nuevas tecnologías que produzcan mayor eficiencia en el frenado, especialmente en vehículos de competición y de alta gama. El estudio del comportamiento de este sistema se ha desarrollado a partir de algunos parámetros, como el desgaste y la temperatura, ya que están sometidos a rozamiento con las pastillas, lo cual la eleva hasta producir un sobrecalentamiento y ocasionar problemas en los discos.

Las pruebas de los esfuerzos producidos en los discos original y alterno mediante ensayo de flexión, tracción e impacto no presentan una diferencia significativa para dar un criterio sobre que material ofrece mejores características y propiedades de los discos de freno. (Cueva F., Ochoa O., Análisis del comportamiento del material del disco de freno de un vehículo Chevrolet Aveo sometido a diversas temperaturas (Tesis). 2012 pág. 174)

Para realizar el análisis y diseño de estos elementos se utilizan varias herramientas tecnológicas como software Ansys, que es de gran ayuda para predecir el comportamiento

de los discos ante varias situaciones y parámetros que por la facilidad del programa se pueden introducir fácilmente y realizar la simulación respectiva.

1.2 Justificación

El presente trabajo realizará la comparación un disco de freno original frente a un disco alternativo de un vehículo Chevrolet Aveo mediante simulación y pruebas experimentales. Este proyecto permitirá conocer algunos aspectos como esfuerzos, deformaciones, desgaste, temperatura y materiales de los discos de frenos con la realización de ensayos los cuales permitirán emitir un criterio sobre el comportamiento de estos elementos.

El desarrollo del tema permitirá encontrar las diferencias entre estos elementos y proporcionar los argumentos necesarios para escoger el tipo de disco más apropiado que ofrezcan mejores prestaciones y seguridad en los vehículos. Con ello se pretende beneficiar a los propietarios de automóviles que por varias razones como choques, desgaste prematuro, mal uso del sistema de frenos, porque los discos han cumplido su vida útil, etc., necesitan repuestos, pero no conocen cuales ofrecen mayor beneficio en el uso, y si son los más adecuados para el correcto funcionamiento de su vehículo.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general:* Realizar la comparación de un disco de freno original frente a un alternativo para un vehículo Chevrolet Aveo mediante pruebas experimentales y simulación en software CAE.

1.3.2 *Objetivos específicos:*

- Averiguar las características de los discos de frenos mediante métodos de investigación para encontrar los problemas más comunes que pueden producirse.
- Analizar la composición interna de los discos de freno mediante ensayos con el espectrómetro para determinar sus características y propiedades.
- Analizar la fricción entre los discos de freno y pastillas mediante ensayos de laboratorio para comparar el desgaste de los elementos.

- Realizar un análisis por el método de los elementos finitos de los discos mediante la utilización de software CAE para obtener los esfuerzos producidos.
- Comparar los resultados obtenidos sobre los discos de freno mediante análisis de datos para validar la hipótesis planteada.

1.4 Hipótesis

Los discos de freno originales poseen mayor resistencia a esfuerzos que los discos alternos durante su funcionamiento.

1.4.1 *Hipótesis nula*

H_0 = Los discos de freno originales tienen la misma resistencia a esfuerzos que los discos alternos durante su funcionamiento.

1.4.2 *Hipótesis alternativa*

H_1 = Los discos de freno originales no tienen la misma resistencia a esfuerzos que los discos alternos durante su funcionamiento.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Sistema de frenos del automóvil

El elemento más importante que forma parte de la seguridad activa en todos los vehículos y que debe estar en constante revisión es el sistema de frenos el cual consta de varios elementos, los principales se nombran a continuación:

2.1.1 El pedal de freno: Este componente es presionado por el conductor para causar la detención parcial o total del vehículo.

Figura 1. Pedal de freno



Fuente: <https://keywestford.com/news/?category=54>

Es el elemento que acciona el sistema de frenos y actúa sobre el cilindro principal o bomba de freno por medio de una varilla, facilitando de esta manera el accionamiento del sistema con el menor esfuerzo. (Zaragoza, 2001, pág. 20)

2.1.2 Servofreno: Es un mecanismo que permite multiplicar la fuerza desarrollada por el conductor al presionar el pedal de freno, para producir una presión mayor en las pastillas y zapatas.

Este elemento es una carcasa dividida en dos cámaras por un diafragma, al presionar el freno se cierra una válvula y se abre otra para el paso del aire del lado del pedal, el vacío generado por el colector de admisión del motor multiplica la presión ejercida por el conductor brindando comodidad y confort. (Zaragoza, 2001, pág. 20)

Figura 2. Servofreno



Fuente: <http://www.autopar.com.ar/servicios.html>

2.1.3 Bomba de freno: Ubicado delante del servofreno, transforma la fuerza del pedal en presión sobre el líquido de frenos que circula por las líneas y conexiones hacia los demás elementos del sistema en las ruedas. (Ágüida, 2012, pág. 460)

Figura 3. Bomba de freno



Fuente: <http://onetautopartes.com/xcat.php?subcat=Bombas%20de%20Freno>.

Existen dos circuitos independientes cada uno controla un par de ruedas, la bomba contiene dos cámaras y en ellas un pistón que envía el líquido de frenos con igual presión a los circuitos delantero y posterior. El depósito se comunica con las dos cámaras y se encuentra ubicado sobre la bomba, contiene un indicador de nivel máximo y mínimo del líquido. (Zaragoza, 2001, pág. 27)

2.1.4 Líquido de frenos: Los líquidos utilizados hoy en día pueden ser mineral o sintético con aditivos que evitan la degradación química por la corrosión y el calor generado al utilizar el freno constantemente. Este fluido ejerce la presión sobre los pistones de la mordaza y debe poseer ciertas características importantes como una estable viscosidad a temperaturas elevadas, producir estanquidad, resistencia a la oxidación, una durabilidad excelente, buen lubricante, un punto de ebullición alta para evitar pérdidas de presión en el frenado si el líquido llega a temperaturas altas, etc. (Ágüida, 2012, pág. 466)

Figura 4. Líquido de frenos



Fuente: <https://www.forocoches.com/foro/showthread.php?t=5076655>

2.1.5 Discos y tambores: Son elementos generalmente construidos de hierro fundido, que al recibir la fuerza de presión de las pastillas o zapatas generan la acción de frenado de las ruedas.

2.2 Sistema de frenos en las ruedas

Anteriormente se nombró los sistemas que generalmente se utilizan en las ruedas de los vehículos para desacelerar la velocidad de marcha del vehículo o detenerlo completamente, las partes que conforman cada uno de ellos se indican a continuación. (Zaragoza, 2001, pág. 35)

2.2.1 Frenos de tambor: Sistema que aprovecha la fricción generada por el contacto entre un tambor y las zapatas para producir el frenado del automóvil. Sus elementos son:

Figura 5. Frenos de tambor



Fuente: <http://www.autofacil.es/accesorios/2015/03/30/funciona-freno-tambor/24254.html>

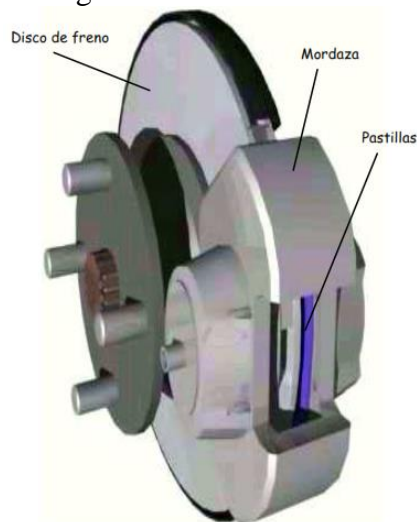
2.2.1.1 El tambor: Es la parte móvil que gira solidario a la rueda, su interior va mecanizado para facilitar el acoplamiento con las zapatas. (Andrino, 2011, pág. 113)

2.2.1.2 *El plato de freno:* Es la parte fija unida a la estructura del vehículo, está formado por un plato soporte de chapa, las zapatas, los mecanismos de accionamiento y los elementos de fijación y regulación. (Andrino, 2011, pág. 113)

2.2.1.3 *Zapatatas:* Son aquellos elementos que friccionan con el tambor para producir el frenado de las ruedas, cuando se presiona el pedal las zapatas se abren lateralmente hasta entrar en contacto. Están constituidas por una parte de acero fijadas a forros de freno que es la parte que entra en fricción. Un muelle recuperador permite regresar las zapatas hasta su posición normal al cesar la fuerza sobre el pedal. (Andrino, 2011, pág. 114)

2.2.2 *Frenos de disco:* Este sistema es empleado en la mayor parte de vehículos en las ruedas delanteras, y en algunos casos también en las posteriores, su característica principal es que al producirse la frenada es capaz de disipar mucho más rápido el calor producido por la fricción entre disco y pastillas que los frenos de tambor, por tal razón los problemas generados por altas temperaturas se reducen. (Ágüida, 2012, pág. 456)

Figura 6. Frenos de disco



Fuente: Mecánica y mantenimiento simple del automóvil. p.119

2.2.2.1 *Funcionamiento:* La fuerza ejercida sobre el pedal es multiplicado por medio del servofreno ubicado antes de la bomba, esta transmite el líquido a presión en el circuito lo que hace que los émbolos en las mordazas empujen las pastillas contra el disco de freno para detener parcial o totalmente el vehículo.

2.2.2.2 *Pastillas de freno:* Son elementos que friccionan con el disco para realizar la acción de frenado, cuenta con una parte metálica sobre la que se apoya el material de

fricción y es la base que se acopla a la pinza de freno. En la actualidad las pastillas vienen con un cable que indica el desgaste del forro y enciende en el tablero una luz de alerta que previene al conductor reemplazar estos elementos. (Ágüida, 2012, pág. 459)

Figura 7. Pastillas de freno



Fuente: Autor

Las características que una pastilla de freno debe reunir para el funcionamiento óptimo del sistema de frenos es por ejemplo el equilibrio entre resistencia a la abrasión y al desgaste, buena estabilidad térmica, permitir buena compresibilidad para que el forro absorba las vibraciones e irregularidades que la superficie del disco de freno pueda tener. Su durabilidad debe ser buena, el material utilizado en los forros debe ser tal que evite dilatarse, permita una resistencia al cizallamiento considerable para evitar posibles problemas durante la frenada como deformaciones, desgaste asimétrico o daños por las altas temperaturas alcanzadas. (Ágüida, 2012, pág. 459)

Uno de los problemas más comunes en las pastillas de freno es el desgaste asimétrico por no estar presionada uniformemente contra el disco. Las causas que ocasionan este defecto son pastillas agarrotadas, mal montaje de las mismas, no contiene o se ha desplazado la chapa anti ruido o la mordaza se encuentra inclinada. Esto provoca un desgaste asimétrico de las pastillas, problemas con el pedal, vibraciones en el volante y la propagación de ruido. (Meyle, pág. 8)

Son varios los elementos que forman parte de los forros de fricción como las fibras, cargas minerales, componentes metálicos, lubricantes, materiales orgánicos y abrasivos. Todos ellos ofrecen una variedad de características y propiedades para reducir el desgaste prematuro, resistir la abrasión y altas temperaturas, con estas características las pastillas de freno resultan más eficientes y brindan mayor seguridad. (Ágüida, 2012, pág. 460)

2.2.2.3 Disco de freno: Es aquella parte móvil dentro del sistema de frenos de disco que gira solidario con la rueda y que al entrar en contacto con las pastillas producen la detención del vehículo. (Águida, 2012, pág. 457)

Figura 8. Disco de freno



Fuente: Sistema de transmisión y frenado. p. 266

En el frenado se transforma la energía cinética en calor y debe disiparse rápidamente para evitar posibles fallas en el sistema, por esto el diseño de los discos de freno es tal que transfiere la mayoría de la energía calorífica hacia el ambiente. En la actualidad existen algunos tipos de discos que son utilizados en los vehículos: (Águida, 2012, pág. 457)

- Discos clásicos o macizos: la superficie de fricción es sólida y lisa, no dispone de ningún tipo de ventilación por lo que acumulan calor fácilmente, con estos las pastillas se cristalizan por lo que deben sustituirse.
- Discos ventilados: Es como si se juntasen dos discos, pero dejando una separación entre los dos, de modo que circule aire a través de ellos. Esto produce un mayor flujo de aire sobre los discos y mayor evacuación de calor.
- Discos perforados: Aumentan la superficie del disco con las perforaciones y además llevan aire fresco a la pastilla del freno evitando el calentamiento en exceso.
- Discos estriados: Gracias a su diseño se obtiene mejor refrigeración. El estriado tiene la función principal de remover el aire caliente y de limpiar la pastilla de suciedades provocadas por la fricción.
- Discos cerámicos: Están hechos de compuesto de carbono en una base cerámica para darle alta resistencia a las temperaturas que los discos operan.

En la composición general de los discos de freno comúnmente se utiliza la fundición gris para la fabricación de los discos de freno, en donde existe la presencia de otros elementos como carbono, silicio, manganeso, fósforo, cobre, azufre, cromo, níquel, molibdeno, etc. cada uno de estos brinda diferentes características para obtener discos de la mejor calidad. A continuación se muestra las características básicas de la fundición gris de los discos de freno. (Ágüida, 2012, pág. 459)

Tabla 1. Propiedades discos

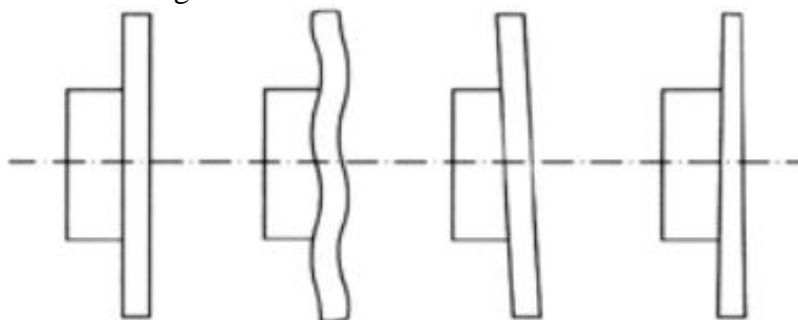
Propiedades	Valor
Resistencia a la tracción	240 N/mm ²
Dureza	170 – 250 HB

Fuente: Manual técnico de las pastillas de freno. p. 37

2.2.3 Problemas en los discos de frenos: Existen algunos defectos producidos en los disco de freno debido a dos razones principales: la presencia de altas temperaturas y el material con el que se fabricó estos elementos. A continuación se presentan los problemas más comunes que ocurren en los discos:

2.2.3.1 Deformación: este defecto es provocado principalmente por un sobrecalentamiento producido por la fricción entre los discos y las pastillas, al presionar constantemente el pedal, esto ocurre principalmente al conducir por carreteras en mal estado o bajadas, también por cambios bruscos de temperatura y defectos en la fabricación de los discos. Todo esto conlleva a graves consecuencias como por ejemplo la ondulación de discos, planicidad en la superficie, o defectos en el paralelismo en las caras. Estos factores son los que provocan las vibraciones y ruidos durante la acción de frenado en los vehículos. (Frum, 2011, pág. 34)

Figura 9. Defectos de los discos de freno



Fuente: Manual técnico de discos de freno. p. 34

2.2.3.2 Discos agrietados: Este tipo de problemas pueden resultar de varios factores, entre los cuales sobresalen las vibraciones en el sistema, un desbalanceo del disco o deformación en el mismo, el frenado irregular por parte del conductor, el material con el que se los fabrica también es un factor importante, al igual que el sobrecalentamiento del sistema ya que las altas temperaturas favorecen la aparición de las grietas, las cuales se forman al existir pequeños poros en el material que debido a las altas temperaturas, crecerán hasta forman la grieta. (Frum 2011, pág. 34)

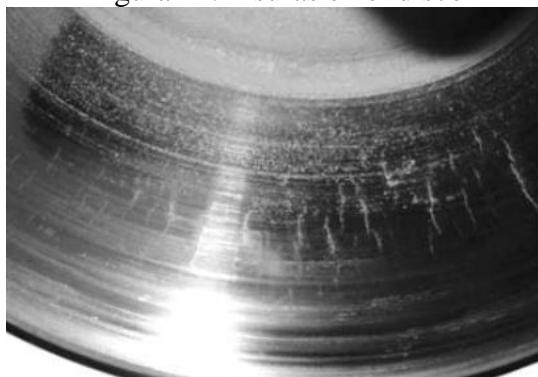
Figura 10. Disco agrietado



Fuente: Manual técnico de discos de freno. p. 34

2.2.3.3 Fisuras: Se producen por dilatación y contracción térmica. Cuando un elemento se somete a altas temperaturas sus partículas empiezan a moverse y separarse entre sí lo que provoca un aumento de su volumen, a esto se le llama dilatación térmica, en cambio a bajas temperaturas las dimensiones de un cuerpo se reducen o disminuyen lo que se conoce como contracción térmica. Los materiales constituyen un papel importante en la construcción de los discos de freno, ya que una selección inadecuada puede causar esfuerzos térmicos que a largo plazo produzcan daños permanentes e irreparables. También el tratamiento de enfriamiento influye en estos casos. (Frum, 2011, pág. 35)

Figura 11. Fisuras en el disco



Fuente: Manual técnico de discos de freno. p. 35

2.2.3.4 Sobrecalentamiento: Producido por las altas temperaturas procedentes del contacto entre disco y pastillas. Los signos de sobrecalentamiento son un color azulado y manchas oscuras en la superficie de la pista de frenado. Las principales causas del sobrecalentamiento son las altas temperaturas por un frenado brusco y deformaciones por mala calidad del material de fricción tanto de las pastillas como de los discos que afectan por igual. (Frum, 2011, pág. 35)

Figura 12. Sobrecalentamiento del disco de freno



Fuente: Manual técnico de discos de freno. p. 35

2.2.4 Material de los discos de freno: Los freno deben cumplir con una serie de parámetros ya que están expuestos a exigencias altas, especialmente lo que tiene que ver con desgaste y temperaturas, por lo cual el material debe tener propiedades que satisfagan los requerimientos establecidos. Por lo general se ha desarrollado el hierro fundido gris como el material más adecuado para la construcción de estos elementos.

El hierro fundido es un tipo de aleación compuesta por carbono en un porcentaje aproximado de 2,11% a 4,5% y silicio no mayor a 3,5%, que son los elementos predominantes. Existen algunos tipos de fundiciones, entre las cuales destacan las siguientes: el hierro gris, blanco, maleable, de grafito compactado y el nodular. También se clasifican en función de su estructura: ferríticos, perlíticos, enfriados y templados o bainitizados. (Kalpakjian, 2002, pág. 113)

La fundición gris es una aleación donde su fractura es de color gris, que contiene carbono y silicio en cantidades considerables. Casi en su totalidad el carbono se encuentra en forma de grafito laminar, esto produce en la fundición buena maquinabilidad, estabilidad dimensional y permite construir piezas complejas. Los discos de freno, bloques de motor son aplicaciones de este material. (Mangonon, 2001, pág. 519)

El grafito laminar también brinda otras características como amortiguar vibraciones y disminuir altas temperaturas. Por ello el hierro gris es adecuado como material para construir los discos de frenos de los vehículos. Los tipos de hierro fundido gris se conocen como ferríticos, perlíticos y martensíticos. Debido a las diferentes estructuras, cada uno tiene propiedades y aplicaciones diferentes. A continuación se muestra algunas clases de hierro gris producidas por fundición continua. (Kalpakjian, 2002, pág.113)

2.2.4.1 *Hierro gris con grafito refinado:* Este es otro tipo de fundición en donde el grafito es muy refinado, la característica principal es el gran acabado superficial que se obtiene. La fundición con grafito refinado no es apto para realizar tratamiento térmico de endurecimiento. (Metal Actual, pág. 16)

2.2.4.2 *Hierro gris perlítico/ferrítico (ASTM A48 Clase 30):* Este material se caracteriza por su estructura perlítica, ferrítica e inclusiones de grafito. Presenta una buena maquinabilidad por el grafito y ferrita encontradas en cantidades considerables aunque la estructura dominante es la matriz perlítica. Existe una desventaja en este tipo de fundición, y es que presenta una baja resistencia mecánica, por lo que al aplicar cierta fuerza sobre el material puede llegar a romperse. Se puede llevar a cabo dos tratamientos térmicos, en aceite q mejora la dureza y resistencia al desgaste y el recocido para mejorar el mecanizado y reducir dureza. Es de gran utilidad en elementos que friccionan con otros y deben soportar temperaturas considerables, dependiendo del tratamiento de enfriamiento se obtiene diversas características. (Metal Actual, pág. 16)

Figura 13. Microestructura perlítico-ferrítico



Fuente: Versabar. Barras Fundidas. p. 13

2.2.4.3 Hierro gris perlítico (ASTM A48 Clase 40): En esta fundición existe presencia de grafito más refinado y una matriz perlítica, lo que hace que tenga un mejor acabado superficial y gran dureza. La resistencia mecánica es mayor en comparación con la fundición gris perlítica ferrítica. Gracias a sus propiedades puede ser utilizado para aplicaciones sujetas a desgaste y temperaturas altas. (Metal Actual, pág. 16)

Figura 14. Microestructura perlítica



Fuente: Versabar. Barras Fundidas. p. 15

2.3 Métodos espectrométricos

Son aquellas técnicas desarrolladas especialmente en la rama de química que estudian las interacciones de la radiación con la materia para determinar en porcentajes los distintos elementos presentes en un material. Se pueden analizar elementos como acero, hierro, aluminio, cobre, etc.

2.3.1 Espectrometría: La espectrometría de emisión óptica es una metodología que permite identificar los porcentajes de elementos como Carbono, Silicio, Fósforo, Azufre, Manganeso, Cromo, etc. que forman parte de una muestra. Cuenta con algunos elementos como el plasma conformado por el gas argón al pasar por una corriente de aire de alta frecuencia genera un campo magnético, un sistema de inducción permite el eficaz aporte de la muestra en el plasma durante un cierto tiempo y un sistema óptico que separa el espectro emitido en varias longitudes de onda, para luego realizar un análisis a partir de las radiaciones. Los pasos a seguir para el desarrollo de la espectrometría de emisión óptica son los siguientes: (Soria, pág. 35)

- Elaborar la probeta del material a ensayar mediante algún dispositivo de corte. Seguir los procesos de las normas correspondientes.
- Lijar y pulir la superficie de la muestra antes de realizar el ensayo.
- Efectuar la limpieza de la superficie de las probetas para eliminar cualquier tipo de impureza producida en el lijado o pulido.
- Calibrar la máquina, seleccionar el electrodo propio para el ensayo con el material preparado. Colocar la probeta en la base de la máquina de espectrometría para desarrollar el ensayo.
- Encender la máquina para el estudio de la muestra y guardar los datos arrojados por el programa propio del instrumento de análisis. Los archivos se pueden guardar en formato PDF.

2.4 Ensayo de dureza

La dureza es la propiedad de los materiales que indica la resistencia a ser penetrado por otro objeto. De otro modo, la dureza generalmente se especifica como la resistencia a la indentación o impresión permanente. Existen algunos tipos de dureza, Vickers, Rocwell y Brinell en esta última para realizar la medición se coloca el material en la base del durómetro, el cual consta de un indentador que puede tener varios diámetros 2.5, 5, 10, milímetros, su selección depende del espesor del elemento a analizar. El durómetro aplica una carga determinada medida en Newton o Kgf durante un periodo de tiempo, luego la marca formada por el indentador en la superficie del material es medida con un microscopio, este dato es utilizado para hallar la dureza Brinell. (Kalpakjian, pág. 68)

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

Donde,

HB = Dureza Brinell

P = Carga aplicada por durómetro

D = Diámetro del indentador

d = Diámetro medido de la marca del indentador

2.4.1 Densidad: Se trata de una magnitud que describe la masa de un material contenida en un determinado volumen. Es la relación entre la masa y el volumen de un objeto, se calcula mediante la expresión:

$$\delta = \frac{m}{V} \quad (2)$$

Donde,

δ = Densidad de material

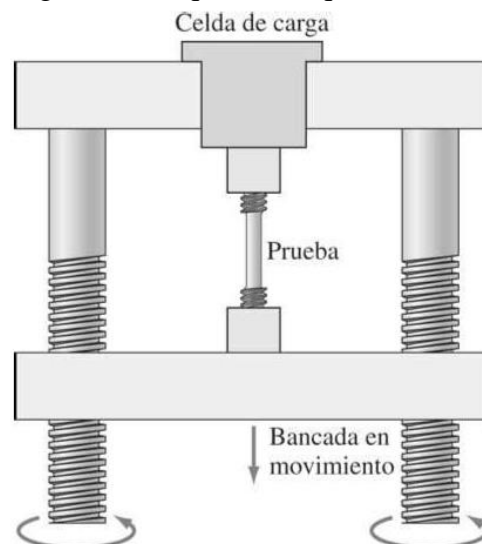
m = Masa del elemento

V = Volumen del elemento

2.5 Ensayo de tracción

Este ensayo permite encontrar la resistencia que tienen los materiales bajo la acción de una fuerza. Para ello se utiliza la máquina universal en donde una probeta es estirada mediante pinzas por una fuerza axial que aumenta constantemente, la muestra empieza a sufrir una deformación elástica hasta llegar al punto de rotura. De esta manera se calcula la resistencia, deformación, el módulo de elasticidad, etc. (Smith, 2006, pág. 262)

Figura 15. Esquema máquina universal



Fuente: Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. pág. 263

2.5.1 Resistencia a la tracción: Es el máximo esfuerzo que un material puede soportar y la máxima carga que se alcanza en la curva tensión deformación al momento de estirarse antes de llegar a su rotura. (Smith, 2006, pág. 268)

2.5.2 Esfuerzo de tensión: Es la relación entre la fuerza aplicada por la máquina universal y la sección transversal de la probeta.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

Donde,

σ = Esfuerzo de tensión

F = Fuerza o carga aplicada

A = Área de la probeta

2.5.3 Módulo de elasticidad: Al aplicar la carga sobre la muestra, este se deforma elásticamente, si la fuerza actuante desaparece la probeta volverá a su longitud inicial. El módulo de elasticidad es la relación existente entre el esfuerzo de tensión aplicada a la probeta y la deformación unitaria (diferencia entre la longitud final de la probeta y la inicial sobre la longitud inicial. (Smith, 2006, pág. 266)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4)$$

En donde,

E = Módulo de elasticidad

ε = Deformación unitaria

2.5.4 Coeficiente de Poisson: Es un parámetro que mide cuanto se estrecha un material al estirarse longitudinalmente y al adelgazarse en sentido perpendicular al estiramiento. Se calcula a través de la fórmula: (Mangonon, 2001, pág. 129)

$$\nu = -\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_L} \quad (5)$$

Donde,

ν = Coeficiente de Poisson

ε_L = Deformación unitaria longitudinal

ε_w = Deformación unitaria transversal

2.5.5 Módulo de corte: Es la resistencia que tiene un material ante la presencia de una deformación por corte. Se determina por la siguiente expresión: (Mangonon, 2001, pág. 130)

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (6)$$

Donde,

G = Módulo de corte

E = Módulo de elasticidad

ν = Coeficiente de Poisson

2.6 Desgaste de los discos de freno

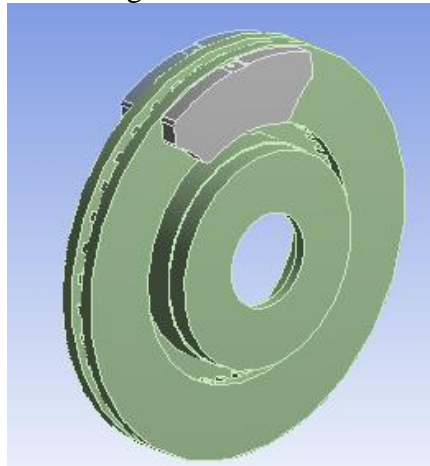
El sistema de frenos de los vehículos tiene como fin producir la fricción entre los discos y pastillas para detener el automóvil, por lo cual se genera el desgaste de estos elementos al entrar en contacto, existen varias definiciones a tomar en cuenta para realizar el estudio como lo son:

2.6.1 Tribología: Es una ciencia relacionada con el contacto entre dos cuerpos, y estudia los fenómenos que se producen durante esta acción como lo son: la fricción y desgaste generados por elementos en movimiento, y la lubricación utilizada como un medio de reducción del desgaste. (Díaz, 2007, pág. 3)

2.6.2 Fricción: Rozamiento producido por la interacción entre dos superficies, existen dos formas de darse este fenómeno, la fuerza cuando un cuerpo se opone al movimiento de otro, o la fuerza que se opone a que otro elemento inicie su movimiento. Es importante recalcar que toda fuerza de rozamiento es contraria a la dirección en la que una persona u objeto se mueve. Existen dos tipos de fricción, la estática que se produce

al encontrarse dos cuerpos en reposo, es decir sin movimiento, la fuerza aplicada no produce movimiento por ejemplo una caja de gran peso apoyada en el suelo. El otro tipo de rozamiento es el dinámico que se origina en un objeto que ya está en movimiento, los discos y pastillas de freno son un claro ejemplo. (Díaz, 2007, pág. 5)

Figura 16. Fricción



Autor: Autor

2.6.3 Desgaste: Cuando dos objetos están en movimiento y en contacto, va a existir una pérdida de material en las caras o superficies, a esto se le llama desgaste. Si la fuerza actuante es grande o el tiempo de duración de esta acción es prolongado hay la posibilidad de mayor deterioro de los cuerpos. (Díaz, 2007, pág. 11)

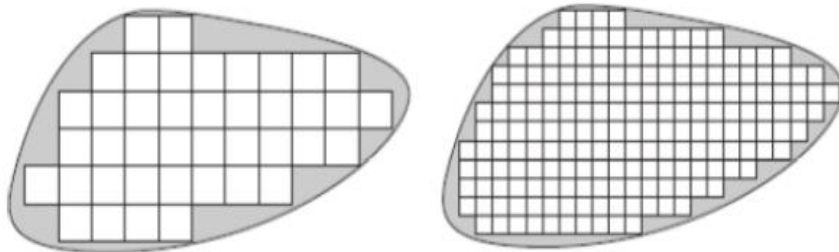
2.7 Método de elementos finitos

Es un método de aproximación, el cual se basa en construir un objeto complicado en piezas pequeñas y manejables para su análisis, esta transformación se llama discretización. A partir de aquello se generan métodos numéricos para la solución de ecuaciones diferenciales y de esta manera resolver problemas ingenieriles.

2.7.1 Análisis por M.E.F.: Hasta la actualidad se han desarrollado una infinidad de piezas de máquinas que son indispensables para su buen funcionamiento, estos elementos a su vez pueden tener geometrías básicas, pero muchas de estas son altamente complejas, lo que hace que el análisis y realización de cálculos exactos de los esfuerzos producidos sobre estas piezas sea prácticamente imposible. Algunos ejemplos de estas geometrías en el campo automotriz son los cigüeñales, pistones, discos y pastillas de freno. El método de elementos finitos para este tipo de cálculos, separa por igual su volumen en partes muy

pequeñas llamados elementos discretos, que por medio de ecuaciones dirigidas a cada parte se puede obtener una solución aproximada a la realidad para ello el Mef tiene la capacidad de aumentar el número de elementos discretos de un dominio. (NORTON, pág. 919)

Figura 17. Discretización

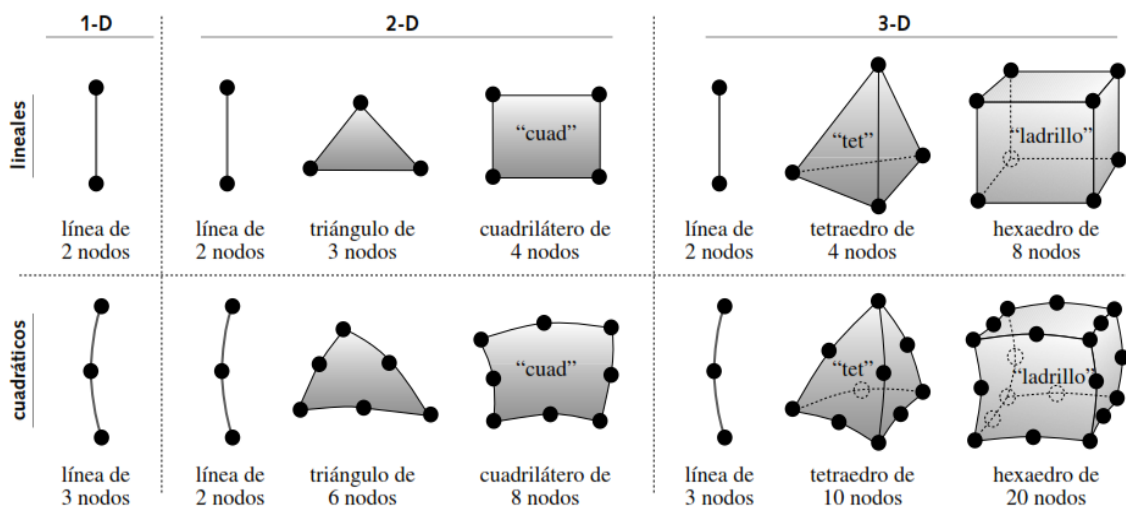


Fuente: Ansys Workbench Mechanical –Introductorio

Existen algunos tipos de elementos para la discretización, que se dividen en tres grupos:

- Elementos unidimensionales (1D): Son aquellos que contienen hasta dos grados de libertad en cada nodo, se utilizan para modelar estructuras, vigas, etc.
- Elementos Bidimensionales (2D): representa elementos superficie, contiene hasta tres grados de libertad por nodo, puede soportar un momento en sus nodos y fuerzas lineales en dos direcciones.
- Elementos tridimensionales (3D): Pueden tener hasta 6 grados de libertad por nodo y soportar momentos y torques en cada nodo o fuerzas lineales en tres direcciones.

Figura 18. Elementos discretos



Fuente: Diseño de Máquinas

El procedimiento matemático para la solución mediante el Mef conlleva varios pasos:

- Discretización del modelo que se va a analizar ya sea elemento en una, dos o tres dimensiones.
- Selección de las funciones de desplazamiento, para elementos 1D es en función de una sola magnitud, para 2D en función de x, y. A continuación un ejemplo de la ecuación de un elemento 1D sometido a esfuerzos térmicos y carga distribuida.

$$[K] * \{u\} = \{f + q(x)\}\{f_r\}; \quad K^e = \frac{E^e A^e}{L^e}; \quad q(x) = q^e * x; \quad f_r = E^e * A^e * \alpha * \Delta T$$

Donde,

$[K]$ = Matriz de rigidez

$\{u\}$ = Vector de variación de desplazamientos

f = Vector de fuerzas

f_r = Vector de fuerzas por defecto de la temperatura

$q(x)$ = Carga distribuida

E^e = Módulo de elasticidad

A^e = Área transversal del elemento

L^e = Longitud del elemento

α = Expansión térmica del material

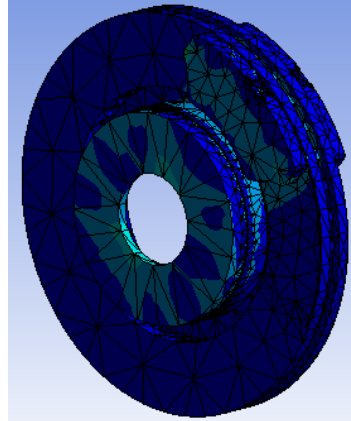
- El siguiente paso es resolver la matriz de elementos mediante las ecuaciones anteriormente nombradas.

$$\frac{E_1^{(1)} A_1^1}{L^{(1)}} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1^{(1)} \\ u_2^{(1)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1^{(1)} \\ f_2^{(1)} \end{Bmatrix} + \frac{(q * L)^{(1)}}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} + E^{(1)} * A^{(1)} * \alpha * \Delta T \begin{Bmatrix} -1 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

- Con los datos calculados en el anterior punto se procede al ensamblaje de la matriz global.
- Se asigna las condiciones de frontera y se procede a la solución de ecuaciones.

2.7.2 Ansys: Software para resolver problemas de ingeniería, contiene herramientas de análisis estructural, eléctricos, de fluidos, cuenta con una serie de aplicaciones térmicas, magnéticas, etc., que facilitan la investigación del comportamiento de nuevos diseños, materiales, piezas de máquinas ante situaciones que afrontan en la vida real.

Figura 19. Diseño en Ansys



Fuente: Autor

2.7.3 Análisis térmico con Ansys: Es una de las aplicaciones de mayor importancia en cuanto a simulación, utiliza una metodología que ayuda a simular el comportamiento de un cuerpo frente a la estimulación por parte de temperaturas definidas por el diseñador. Algunos elementos trabajan a altas temperaturas lo que produce fallas en el funcionamiento de una máquina, lo que hace necesario obtener modelos y propiedades de los materiales para la construcción de piezas de mayor resistencia y durabilidad, Ansys permite experimentar con diferentes diseños para obtener el más adecuado sin tener que construirlos en la realidad, evitando pérdidas de materiales, tiempo y dinero, esta herramienta analiza pérdidas de potencia y energía térmica por efecto de la fricción y fuentes externas, simula modelos térmicos con gran precisión. (ANSYS, Thermal Analysis)

Módulo transient structural: Es aquel módulo donde se estudia un objeto o sistema sometido a cargas dependientes del tiempo, Ansys permite determinar todo tipo de desplazamientos, tensiones, temperaturas que puede soportar un objeto, fuerzas y esfuerzos que varían con el tiempo, entre otros. Realiza análisis en el campo lineal o no lineal, este último se refiere a deformaciones proporcionales, contactos, etc. El análisis no lineal emplea el método de Newton-Raphson para solucionar este tipo de problemas. (MÉTODOS NUMÉRICOS, pp. 73)

2.7.4 *Etapas del análisis:* Para llegar a encontrar los resultados del análisis mediante Ansys se debe llevar a cabo tres fases. (MÉTODOS NUMÉRICOS, pp. 70-71)

2.7.4.1 *Pre Proceso:* Se refiere a definir las características, propiedades, condiciones del modelo para el desarrollo del cálculo.

- Modelado o importación de la geometría.
- Selección del tipo de elementos que se utilizará ejemplo, elementos de tensiones planas, en tres dimensiones, de contacto, etc.
- Definición del material de los elementos a analizar. Se puede seleccionar de la biblioteca o crear uno nuevo si se tienen las propiedades principales.
- Mallado del elemento, esta opción tiene varias funciones para definir la calidad de la malla, crear la más adecuada dependiendo del objeto en estudio.
- Aplicación de cargas y condiciones de contorno.

2.7.4.2 *Proceso:* En esta etapa trabaja el software, realizando todo el cálculo de las condiciones propuestas en el pre proceso para luego generar la solución. El software realiza los siguientes pasos:

- Selección del tipo de cálculos que va a analizar, ya sea transitorio, estático, de pandeo, etc.
- Configuración: en el que selecciona intervalos de tiempo, número de iteraciones, etc.
- Proceso: el software toma la información propuesta en el pre proceso, desarrolla las matrices de rigidez, define ecuaciones y las resuelve para llegar a la solución.

2.7.4.3 *Post proceso:* Se trata de la solución de todo el proceso anterior, donde se puede apreciar gráficas, resultados que se deben interpretar por parte del analista.

CAPÍTULO III

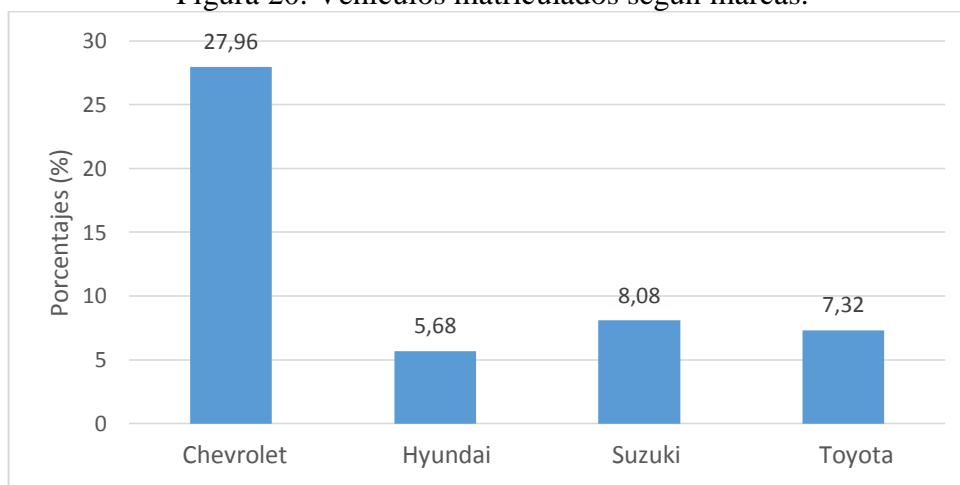
3. DATOS GENERALES Y PRUEBAS EXPERIMENTALES

3.1 Selección de automóvil para el análisis de discos de freno.

Para realizar este análisis se debe seleccionar un tipo de disco de freno de alguna marca de vehículo en particular, para lo cual se investiga la marca de automóvil que circula en mayor cantidad en el país, con la ayuda del anuario de estadísticas y transportes desarrollada por el INEC se llega a encontrar algunos datos que sirven de ayuda para elegir el vehículo.

Los datos obtenidos del INEC solo se encuentran tabulados hasta el año 2015, se procede a realizar una proyección hasta el 2017 para analizar en crecimiento o decrecimiento del porcentaje de los vehículos matriculados en el país. Se analiza los datos más relevantes en cuanto a sus porcentajes. Para la proyección se tomó los datos desde el año 2012 hasta el 2015, mediante Excel se procedió a realizar el cálculo correspondiente de la tendencia en el año 2016 y 2017 de los vehículos matriculados.

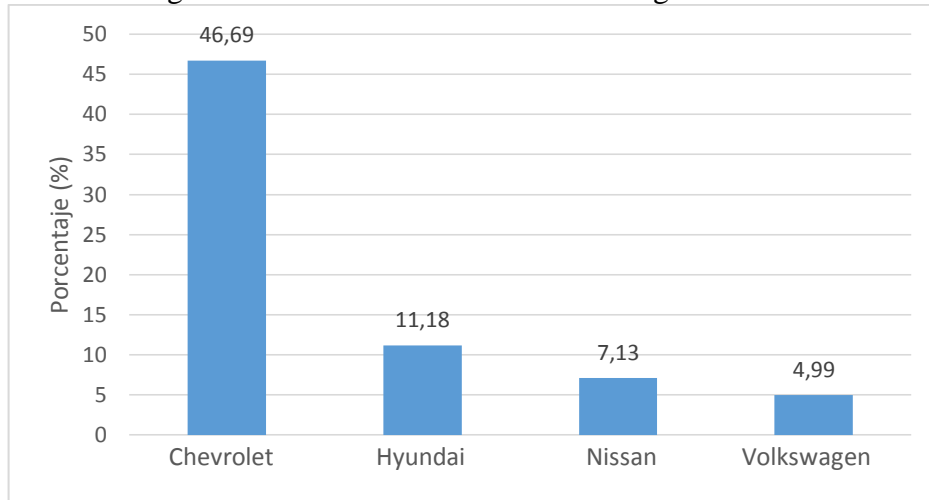
Figura 20. Vehículos matriculados según marcas.



Fuente: Autor

Los vehículos matriculados también se dividen en automóviles, camionetas, motocicletas, jeep y otros, en esta última categoría se agrupan autobuses, camiones, furgonetas, tanqueros, tráileres y volquetas. En los automóviles matriculados la mayoría pertenece a la marca Chevrolet.

Figura 21. Automóviles matriculados según marcas.



Fuente: Autor

Con estos datos se puede deducir que la mayoría de vehículos que circulan en nuestro país son modelos Chevrolet razón por la cual el análisis de los discos de freno a realizar se centra en el automóvil Aveo de esta marca.

Al seleccionar el vehículo se procede a la compra de los respectivos elementos a analizar, es decir los discos y pastillas de freno tanto originales como alternos, para estos últimos se investiga la marca más utilizada por los propietarios de vehículos Chevrolet Aveo.

En la encuesta realizada a una de las empresas que trabajan en servicios automotrices como lo es Autofreno, manifiesta que los repuestos en discos y pastillas de freno con las que trabajan son Fremax, Durako y Hi-Q, y que el tipo de mayor demanda por sus clientes es Durako, con esta información se llega a la conclusión de adquirir ambos repuestos en esta marca.

Figura 22. Discos y pastillas de freno alterno y original



Fuente: Autor

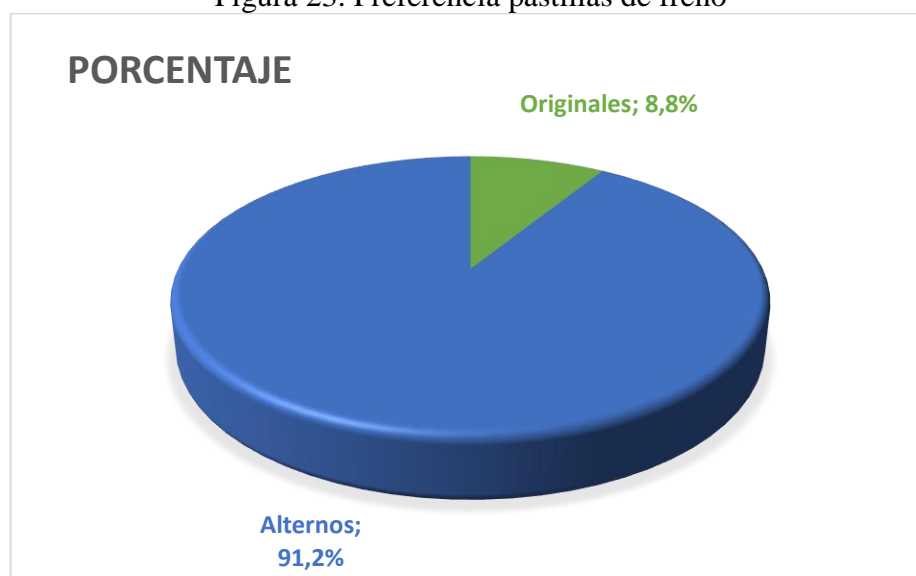
3.2 Problemas más comunes en los discos y pastillas de freno

Los discos y pastillas de freno en el automóvil juegan un papel muy importante ya que son los principales elementos en cuanto a seguridad de los ocupantes del vehículo y de peatones. En la actualidad existen repuestos originales y alternos para reemplazar los elementos que vienen de fábrica, en cuanto a los alternos existen de muchas marcas como las ya nombradas anteriormente en este capítulo, que son más accesibles especialmente en cuanto a costos.

La encuesta realizada permite conocer algunos aspectos relacionados con los discos y pastillas de freno, por ejemplo la elección de repuestos originales o alternos y los problemas más comunes que se producen. Esta investigación se realizó a ciertos propietarios de vehículos particulares y la gran mayoría a los choferes de diferentes cooperativas de taxis en la ciudad de Riobamba, ya que sus vehículos se mantienen en constante movimiento, por lo cual el sistema de frenos se utiliza constantemente, por tal razón se pide la opinión de dichos conductores.

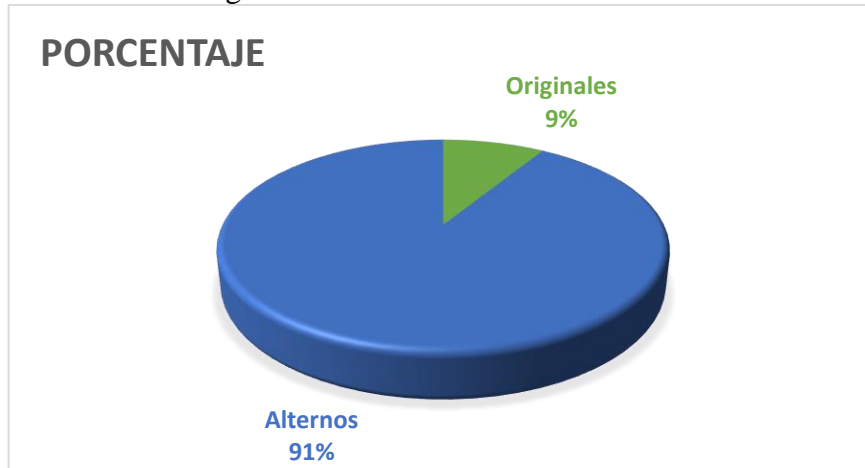
El tamaño de la muestra de la población encuestada en este caso es de 68 personas, donde la gran mayoría opina que utiliza repuestos genéricos para sus vehículos. A continuación se muestra los resultados de la encuesta realizada en cuanto a la preferencia de propietarios de vehículos por repuestos originales o alternos.

Figura 23. Preferencia pastillas de freno



Fuente: Autor

Figura 24. Preferencia discos de freno

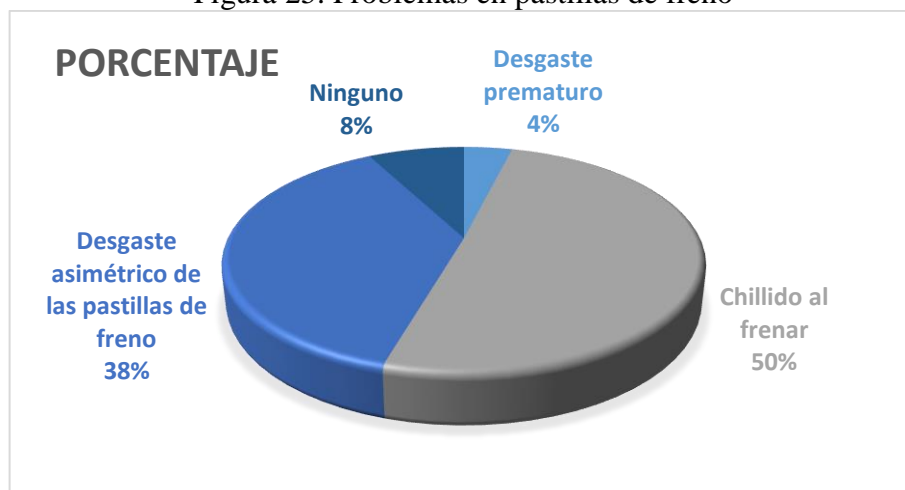


Fuente: Autor

Como la mayoría de encuestados son miembros de una cooperativa de taxis, dieron a conocer que resulta más económico y rápido realizar los cambios de discos y pastillas de freno en un taller de confianza que realizarlo en un concesionario, ya que en éste último perderían tiempo y resultaría más costoso.

Los problemas más comunes producidos en las pastillas de freno según la encuesta se centra en el chillido al frenar y el desgaste asimétrico luego de un determinado tiempo de uso. Cabe resaltar que la mayoría de repuestos son alternos, ya que los encuestados tienen preferencia por este tipo de elementos.

Figura 25. Problemas en pastillas de freno



Fuente: Autor

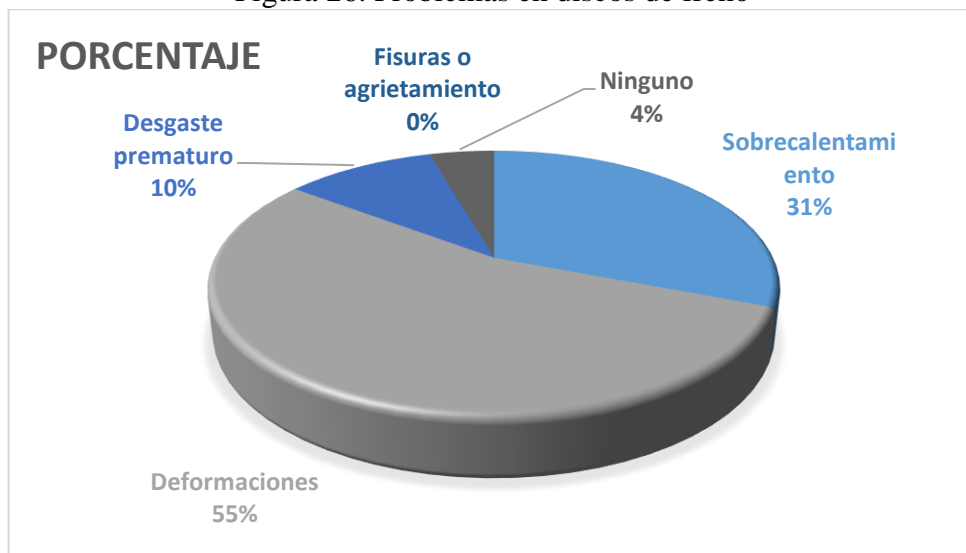
El chillido a frenar puede ser ocasionado por varias razones, las mismas partículas de las pastillas pueden ocasionar ruidos, ya que el material que está hechas puede producir los

chillidos al frenar. Otra razón de este problema es el mal estado de los discos, cuando estos tienen deformaciones o un gran desgaste por el uso.

El desgaste asimétrico de las pastillas se produce principalmente por deformaciones en los discos de freno que al entrar en contacto la presión entre estos dos elementos hacen que las pastillas se desgasten de una manera no uniforme. Como se puede dar cuenta, los discos de freno están involucrados en los problemas con las pastillas de freno, por tal razón es necesario utilizar siempre elementos que reduzcan todas las causas que generan dichos problemas, por ello se realiza un análisis de los discos de freno originales y alternos para encontrar los más óptimos para el uso.

Los discos de freno también presentan algunos problemas que afectan el funcionamiento óptimo del sistema de frenado, el sobrecalentamiento y deformaciones son los más frecuentes.

Figura 26. Problemas en discos de freno



Fuente: Autor

En cuanto a el sobrecalentamiento de los discos de freno se debe a que el material es demasiado blando, la fricción con las pastillas producen altas temperaturas lo que deteriora tanto discos como pastillas y esto da lugar a una gran deficiencia de la capacidad de frenado. El estilo de frenado tiene mucho que ver en las deformaciones de los discos, pisar el freno de manera repetitiva produce una gran cantidad de calor lo que provoca dicho problema, si el material de los discos de freno no es el adecuado habrá mayores posibilidades de que se originen alabeos. Esto también lleva a la conclusión de que se

necesita encontrar los discos de freno que brinden mejores características contra el desgaste y altas temperaturas.

3.3 Pruebas experimentales

3.3.1 Espectrometría: Para este ensayo se debe preparar el material a ensayar, es decir construir las probetas de la prueba, para este fin se procede a cortar los discos de freno en una máquina eléctrica. Para crear las muestras del ensayo de espectrometría se toma como referencia la norma ASTM E3-11, guía estándar para la preparación de las muestras metalográficas la cual indica una serie de criterios a tomar en cuenta para la elaboración.

Para el corte del material se utilizó dos tipos de máquinas, una sierra eléctrica que permite realizar los cortes largos, y una sierra de cinta para los cortes pequeños, obteniendo de una manera rápida las probetas requeridas. Cabe destacar que la sierra eléctrica automáticamente al encenderla permite también refrigerar el elemento de corte y el material a trabajar para evitar posibles cambios en la estructura, mientras que la sierra de cinta no cuenta con este detalle, por lo que la refrigeración se realiza manualmente durante la operación. Ambas máquinas realizan un buen trabajo, pero la segunda es mucho más precisa al realizar los cortes, ya que cuenta con un movimiento constante de la sierra al momento de trabajar.

Figura 27. Sierra eléctrica



Fuente: Autor

Figura 28. Sierra de cinta



Fuente: Autor

La limpieza de las probetas es de gran importancia, ya que de esta manera se eliminan todo tipo de contaminantes como grasas, aceites, residuos de refrigerante, polvos, basura, entre otros, para obtener muestras limpias que en el análisis proporcionen resultados confiables. El esmerilado y pulido de las muestras se pueden realizar de varias maneras, para esta actividad se utiliza un método manual mediante lijas, empezando con las más gruesas hasta una de granulado fino, ya que solo tenemos dos muestras el proceso se desarrolla eficaz y eficientemente. Los pasos desarrollados para obtener las probetas destinadas al ensayo se detallan en el anexo A.

Figura 29. Probetas alterna y original



Fuente: Autor

Para desarrollar el análisis de los materiales, se utilizó espectrometría por arco y chispa. El modelo utilizado se denomina Q4 Tasman, consta de un sistema que permite inspeccionar e identificar los materiales de un objeto en específico. La herramienta puede analizar elementos como el cobre, aluminio y hierro, ideal para trabajar con los discos de freno ya que son construidos a partir de la fundición gris.

Figura 30. Espectrómetro por chispa



Fuente: <http://www.bruker.com.br/axs/espectrometriaEmissaoOpticaQ4Tasman.html>

Esta técnica identifica varios elementos mediante el espectro de emisión utilizando el argón que conforma el plasma como fuente de excitación. Un sistema óptico permite separar el espectro emitido en diferentes longitudes de onda para realizar un análisis a partir de las radiaciones emitidas y obtener los diferentes compuestos del material. El proceso para la obtención de los datos de este ensayo de espectrometría por arco y chispa de detalla en el anexo B.

Tabla 2. Resultados análisis por espectrometría

METAL	DISOCO ALTERNO (%)	DISCO ORIGINAL (%)
Carbono (C)	3,380	3,406
Silicio (Si)	2,121	1,869
Manganeso (Mn)	0,823	0,596
Fósforo (P)	0,167	0,139
Azufre (S)	0,040	0,056
Cromo (Cr)	0,054	0,278
Molibdeno (Mo)	0,004	0,005
Níquel (Ni)	0,021	0,015
Cobre (Cu)	0,036	0,173
Plomo (Pb)	0,019	0,013
Estaño (Sn)	0,005	0,052
Titanio (Ti)	0,020	0,026
Vanadio (V)	0,012	0,002
Hierro (Fe)	92,82	93,29

Fuente: Autor

3.3.2 Ensayo metalográfico: Esta prueba radica en el estudio de la constitución y estructura de los discos de freno, mediante un examen realizado sobre su superficie, determinando de esta manera las características de la microestructura. Se basa en la ampliación de la superficie mediante instrumentos ópticos para poder visualizar las particularidades microscópicas. Para la obtención de las probetas se recurre al mismo procedimiento que en el caso de la espectrometría. La norma aplicada para el desarrollo de este ensayo es la ASTM E3, guía estándar para la preparación de muestras metalográficas. Para esta prueba se recurre al uso principalmente de tres máquinas, lijadora y pulidora para eliminar ralladuras o porosidades en la superficie y el microscopio que permite observar la microestructura ampliada a 50x, 100x, 200x y 500x. El proceso ejecutado para la obtención de los datos se describe en el anexo C.

Figura 31. Máquina de lijado



Fuente: Autor

Figura 32. Máquina de pulido

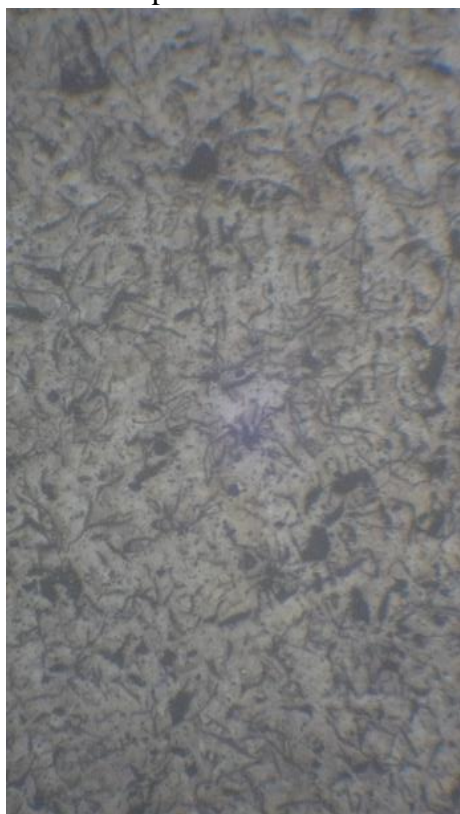


Fuente: Autor

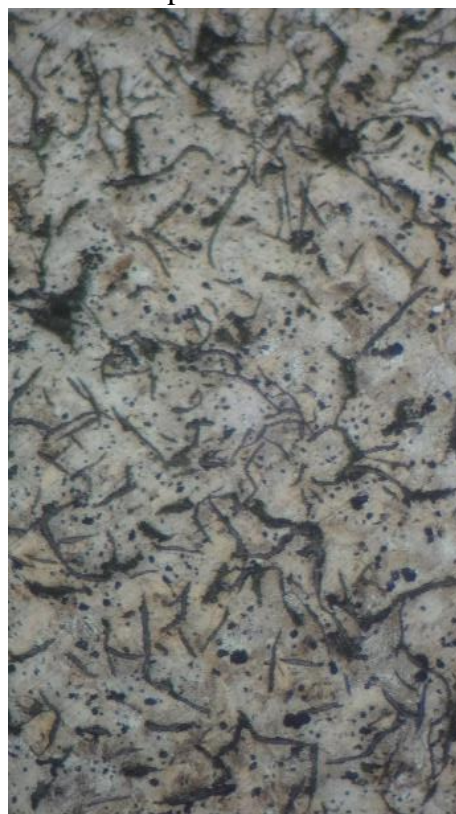
A continuación se detalla los resultados obtenidos mediante el ensayo metalográfico de las muestras del disco original y alterno para el estudio de la matriz dentro de su estructura.

Figura 33. Microestructura disco original

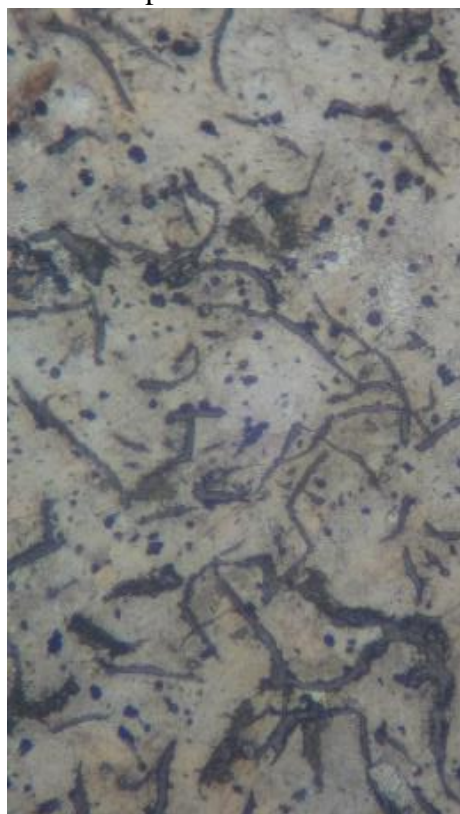
Ampliación a 50x



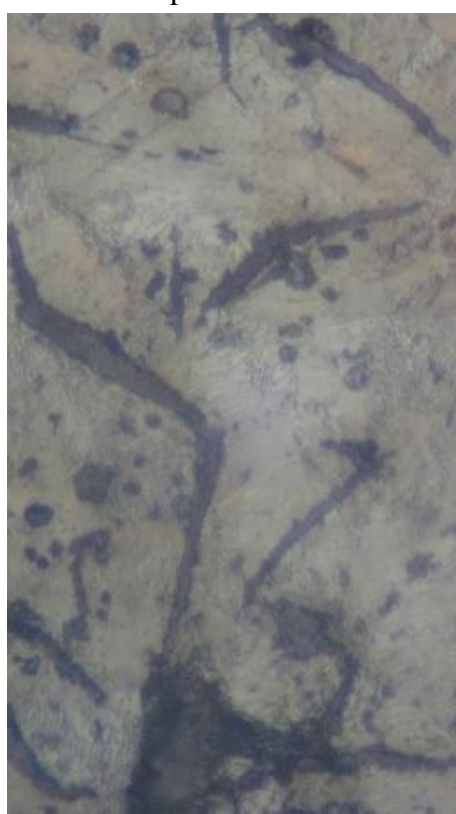
Ampliación a 100x



Ampliación a 200x



Ampliación a 500x

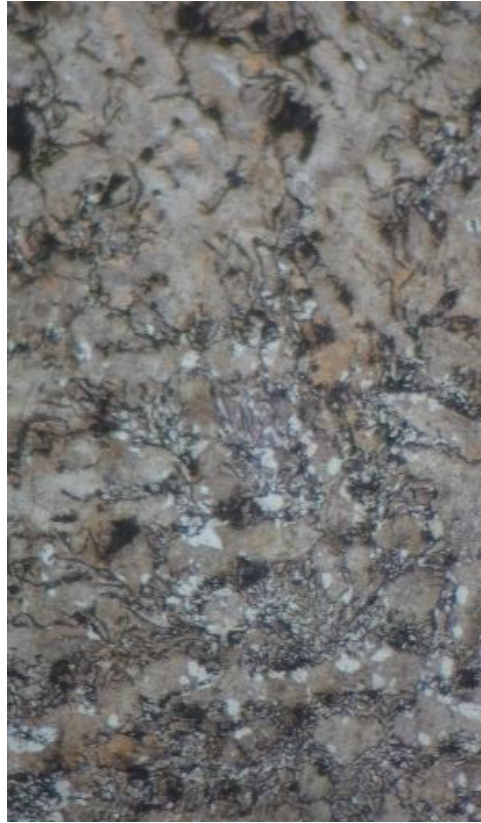


Fuente: Autor

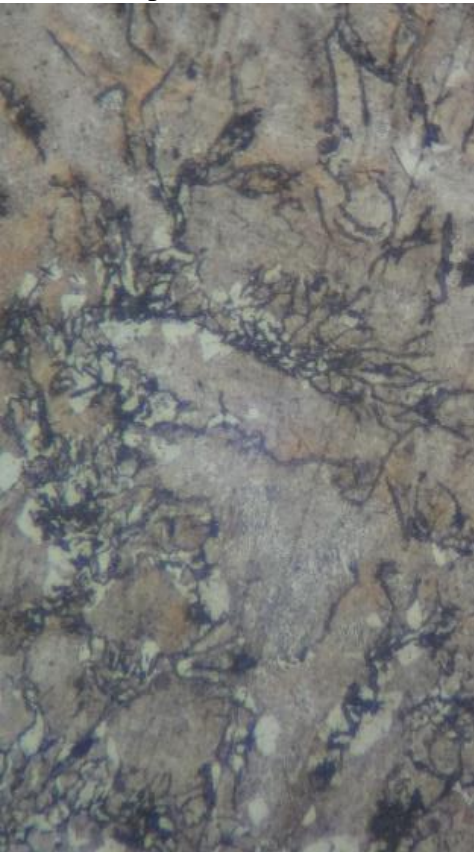
Figura 34. Microestructura disco alterno
Ampliación a 50x



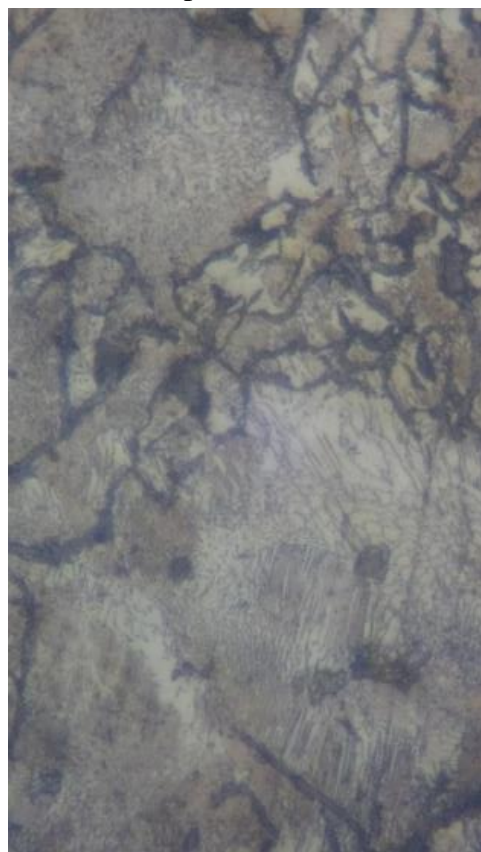
Ampliación a 100x



Ampliación a 200x



Ampliación a 500x

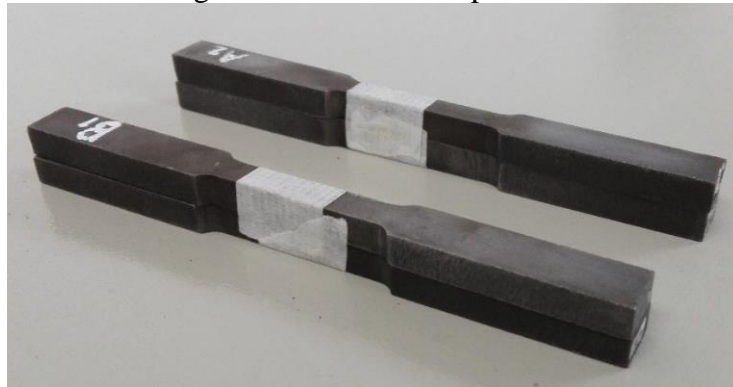


Fuente: Autor

3.3.3 Ensayo de tracción: Mediante esta prueba se calcula la resistencia máxima a la tensión que puede soportar el material con el que se fabricó los discos de freno. Para el ensayo propuesto se utiliza la máquina universal WAW600B marca JINAN LIANGONG TESTING TECHNOLOGY CO., LTD que contiene un peso de 1500 kilogramos aproximadamente, una capacidad de carga hasta de 600 kN, cuenta con un software computarizado que permite realizar las diferentes pruebas como tensión, compresión, dobléz, etc., un sistema que regula las fuerzas aplicadas en cada ensayo y almacena los resultados obtenidos.

Para efectuar el ensayo de tracción es necesario normalizar las piezas con el objetivo de obtener resultados más precisos, confiables y bajo estándares vigentes. Las probetas se construyeron cumpliendo con los requisitos nombrados en la norma ASTM E8: Métodos de prueba estándar para pruebas de tensión de materiales metálicos. Las máquinas utilizadas para realizar el corte de las probetas son las mismas utilizadas para el ensayo metalográfico. Luego se mecaniza mediante una herramienta de precisión para obtener las probetas para ambos discos de freno.

Figura 35. Mecanizado probetas



Fuente. Autor

Al finalizar el mecanizado se obtienen cuatro probetas destinadas al ensayo de tracción, de esta manera los resultados serán mucho más confiables y aproximados a los valores reales en cuanto a la resistencia del material.

En los resultados obtenidos de resistencia a la tracción de cada probeta, se observa una diferencia significativa, donde mayor resistencia ofrece los discos originales. Pero ambos están dentro del rango establecido por la norma colombiana. El procedimiento para obtener los datos se especifican en el anexo D.

Tabla 3. Resultados ensayo de tracción

Probetas	Carga máxima (KN)	Esfuerzo máximo (MPa)
Disco Original		
P-A1	9,78	235,10
P-A2	9,4	266,44
Promedio	9,59	250,77
Disco Alterno		
P-B1	6,8	188,89
P-B2	6	181,82
Promedio	6,4	185,355

Fuente: Autor

3.3.4 Prueba de dureza: Este ensayo permite determinar la resistencia a la penetración que posee cada material de los discos de freno. Existen algunas pruebas que permiten hallar la dureza de los materiales, para el caso de los discos original y alterno se recurre a la máquina de ensayo Brinell que existe en el laboratorio de la facultad y que ofrece mayor precisión en resultados, se desarrolla el estudio tomando los criterios de la norma ASTM E10 Método de pruebas estándar de dureza Brinell para materiales metálicos. El procedimiento comienza en el durómetro que aplica una carga al indentador de forma esférica de 2,5 mm de diámetro que penetra en la superficie de la muestra, esta acción deforma la probeta dejando una marca.

Figura 36. Durómetro



Fuente: Autor

Para encontrar el número de dureza Brinell se mide el diámetro de la indentación mediante el microscopio de marca mitutoyo.

Figura 37. Microscopio



Fuente: Autor

Luego de medir las indentaciones, la dureza se calcula según la fórmula siguiente:

$$HB = \frac{2P}{\pi * D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Donde,

HB = Dureza Brinell

P = Carga Aplicada por durómetro

D = Diámetro del indentador

d = diámetro medido de la marca del indentador

Los resultados obtenidos del ensayo de dureza se muestran a continuación.

Tabla 4. Dureza Brinell

Número de ensayo	Disco original (HB)	Disco alterno (HB)
1	206,48	198,44
2	206,48	190,84
3	202,41	190,84
4	206,48	194,59
5	210,67	198,44
Promedio	206,50	194,63

Fuente: Autor

3.3.5 *Ensayo de desgaste:* Para desarrollar el análisis de la fricción generada por el contacto entre disco y pastilla, se cuenta con un banco especializado en pruebas del sistema de frenos, en el cual se monta los elementos a ensayar, un motor eléctrico simula la rotación del eje de la rueda, la presión en la mordaza sobre las pastillas de freno es igual que en los vehículos y el accionamiento del pedal se realiza mediante una palanca. Las partes que conforman el banco de pruebas se encuentran en mal estado por lo que se realiza un mantenimiento reparación y cambio de algunos componentes, como las cañerías del líquido de frenos, la mordaza y bomba, el eje del motor eléctrico, conexiones eléctricas del sistema, montaje de un motor de vacío para el accionamiento del servo, etc. El anexo E muestra el procedimiento y sugerencias para la realización del ensayo.

Figura 38. Bando de pruebas



Fuente: Autor

Al tener como recurso el banco de pruebas del sistema de frenos, las probetas que se van a utilizar son los mismos discos y pastillas adquiridos.

Figura 39. Probetas ensayo desgaste



Fuente: Autor

La prueba se realizó en intervalos de 20 minutos, para evitar daños en el motor por el continuo esfuerzo que se producía al accionar el sistema de frenos. La presión ejercida por la bomba es de aproximadamente 30 psi.

Tabla 5. Resultados prueba de desgaste

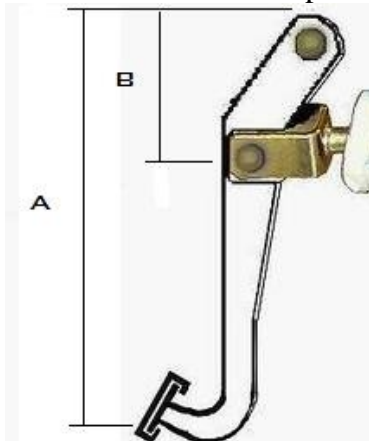
Medición	Desgaste repuestos originales (mm)		Desgaste repuestos alternos (mm)	
	Disco	Pastilla	Disco	Pastilla
Di	0	0	0	0
D1	0,2	1,65	0,8	3,45
D2	0,35	1,1	0,85	3,5
D3	0,25	1,25	0,9	3,7
D4	0,2	1,7	0,65	3,35
D5	0,25	1,5	0,7	3,55
D6	0,3	1,2	0,9	3,9
D7	0,1	1,45	0,9	3,5
D8	0,6	1,55	1,05	3,8
D9	0,3	1,5	0,8	3,9
D10	0,45	1,15	0,7	3,95
Promedio	0,3	1,41	0,83	3,66

Fuente: Autor

3.3.6 Análisis por el método de elementos finitos: Conlleva una serie de pasos para la simulación del contacto disco pastillas, los cuales se detallan a continuación:

Cálculos para el análisis térmico-estructural: Para inicial el cálculo hay que tener en cuenta algunas dimensiones, las cuales se toma de un vehículo Chevrolet Aveo como las medidas de los brazos del pedal, el diámetro del cilindro principal y de la mordaza, etc.

Figura 40. Dimensiones brazo pedal de freno



Fuente: <http://www.circulaseguro.com/pisa-el-freno-5-multiplicacion-de-la-fuerza-el-servofreno-de-vacio/>

Datos:

$$F_p = 750 \text{ N}$$

$$A = 300 \text{ mm}$$

$$B = 100 \text{ mm}$$

$$\phi_{cp} = 20,64 \text{ mm}$$

$$\phi_{cm} = 54 \text{ mm}$$

- Fuerza sobre las pastillas: Se calcula la fuerza aplicada en el cilindro principal por medio de la ecuación:

$$F_{cp} = \frac{F_p \times A}{B}$$

Donde,

F_{cp} = Fuerza en el cilindro principal

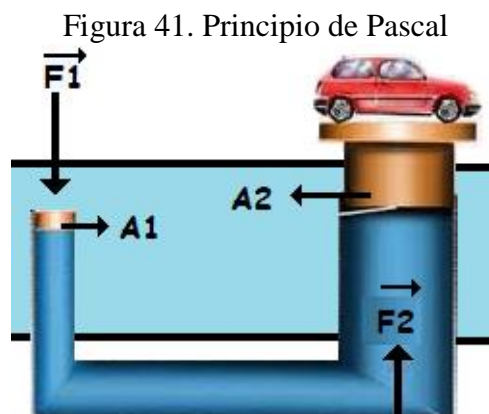
F_p = Fuerza aplicada por el pie

A = Brazo pedal de freno

B = Brazo pedal de freno

$$F_{cp} = \frac{750 \text{ N} \times 300 \text{ mm}}{100 \text{ mm}} = 2250 \text{ N}$$

Para encontrar la presión ejercida en el cilindro de la mordaza se toma el principio de Pascal que se resume en que la presión ejercida sobre un fluido dentro de un recipiente se transmite de manera uniforme por toda la sustancia.



Fuente: <http://mecanicadefluidos2015.blogspot.com/2015/02/principio-de-pascal.html>

La ecuación que gobierna este principio permite el cálculo de la fuerza ejercida sobre el pistón en la mordaza de freno es:

$$\frac{F_{cp}}{A_{cp}} = \frac{F_{cm}}{A_{cm}}$$

Donde

F_{cm} = Fuerza en el cilindro en la mordaza

A_{cp} = Área del cilindro principal

A_{cm} = Área del cilindro en la mordaza

ϕ_{cp} = Diámetro cilindro principal

ϕ_{cm} = Diámetro cilindro mordaza

Se determina el valor de las áreas de los cilindros principal y del cilindro en la mordaza para realizar el cálculo posterior.

$$A_{cp} = \frac{\pi \phi_{cp}^2}{4} = \frac{\pi (20,64 \text{ mm})^2}{4} = 334,59 \text{ mm}^2$$

$$A_{cm} = \frac{\pi \phi_{cm}^2}{4} = \frac{\pi (54 \text{ mm})^2}{4} = 2290,22 \text{ mm}^2$$

$$\frac{F_{cp}}{A_{cp}} = \frac{F_{cm}}{A_{cm}}$$

$$\frac{2250 \text{ N}}{334,59 \text{ mm}^2} = \frac{F_{cm}}{2290,22 \text{ mm}^2}$$

$$F_{cm} = \frac{2250 \text{ N} \times 2290,22 \text{ mm}^2}{334,59 \text{ mm}^2} = 15400,92 \text{ N}$$

De esta manera se determina el valor de la fuerza aplicada sobre el pistón en la mordaza, que se encarga de presionar las pastillas de freno contra el disco, este valor es de 15400 N aproximadamente.

- Densidad: Para el cálculo de esta propiedad se utiliza la relación masa sobre volumen, donde primero se encuentra el peso de los discos de freno, mediante una balanza que nos permite calcularla. Se observa que la masa del disco original es menor que la del disco alterno.

Tabla 6. Masa de discos de freno

Elemento	Masa (kg)
Disco original	5,3
Disco alterno	5,5

Fuente: Autor

El software SolidWorks calcula automáticamente algunas propiedades físicas en relación con los modelos realizados, uno de ellos es el volumen que se tomará como dato para el cálculo de la densidad.

Tabla 7. Volumen de discos de freno

Elemento	Volumen (m ³)
Disco original	0.00070564476
Disco alterno	0.00072151922

Fuente: Autor

Con los datos establecidos anteriormente se procede a determinar la densidad de cada disco de freno.

Disco original

$$\delta = \frac{m}{V} = \frac{5.3 \text{ kg}}{0.00070564476 \text{ m}^3} = 7510.86 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Disco alterno

$$\delta = \frac{m}{V} = \frac{5.5 \text{ kg}}{0.00072151922 \text{ m}^3} = 7622.80 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- Resistencia a la tracción: Al realizar el ensayo de tensión en la máquina universal esta arroja algunos resultados entre los cuales la resistencia a la tensión.

Tabla 8. Valores resistencia a la tracción

Ensayo	Disco original	Disco alterno
Resistencia a la tracción	250,77 MPa	185,36 MPa

Fuente: Autor

Otras propiedades se relacionan con los ensayos anteriores, ya que a través de aquellos resultados se puede deducir el tipo de material de cada disco, para el original los datos se asemejan a la clase 40 según ASTM, y el alterno al tipo 25 de la misma norma. Con el software CES EduPack se obtienen las propiedades faltantes para el análisis. Para hallar la equivalencia de datos entre la ASTM y BS del programa se recurre al anexo F.

Tabla 9. Propiedades disco original

Módulo de Young	130,5 GPa
Radio de Poisson	0,255
Resistencia a la compresión	965,27 MPa
Calor específico	482,5 J/kg.K
Conductividad térmica	46 W/m.k
Coef. Expansión térmica	1,05 e-5 C ⁻¹
Resistividad	70 μohm.cm
Permeabilidad relativa	10000

Fuente: CES EduPack

Tabla 10. Propiedades disco alterno

Módulo de Young	99,5 GPa
Radio de Poisson	0,255
Resistencia a la compresión	668,79 MPa
Calor específico	332,5 J/kg.K
Conductividad térmica	57 W/m.k
Coef. Expansión térmica	1,05 e-5 C ⁻¹
Resistividad	80 μohm.cm

Fuente: CES EduPack

Para el material de los forros de freno se toma como referencia las propiedades que brinda la marca Trimat para pastillas semimetálicas, que cumplen con las exigencias establecidas en la norma NTE INEN 2185 para materiales de fricción par frenos automotrices.

Tabla 11. Propiedades pastillas de freno

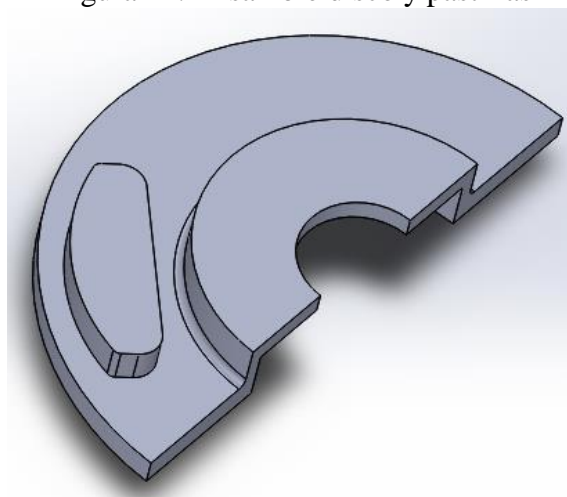
Densidad	1940 kg/m ³
Módulo de Young	2,07e11
Radio de Poisson	0,32
Resistencia a la tensión ultima	40 MPa
Resistencia a la compresión ultima	148 MPa
Calor específico	1344 J/kg.K
Conductividad térmica	0,539 W/m.k
Coef. Expansión térmica	9 e-6 C ⁻¹

Fuente: Trimat. <http://www.trimat.co.uk/woven-lining.html>

3.3.6.1 Pre-proceso: Son los pasos que se relacionan con la definición del modelo en el cual se impone las características del problema como:

- **Modelado y ensamble:** El software SolidWorks es un programa de diseño asistido por computadora de gran utilidad y sencillez al momento de crear modelos mecánicos por ello es ideal para realizar la representación digital de los discos y pastillas de freno requeridos para el posterior análisis. La creación del disco y pastilla de freno se realizó de manera simplificada para reducir las ecuaciones de cálculo y tiempo de análisis.

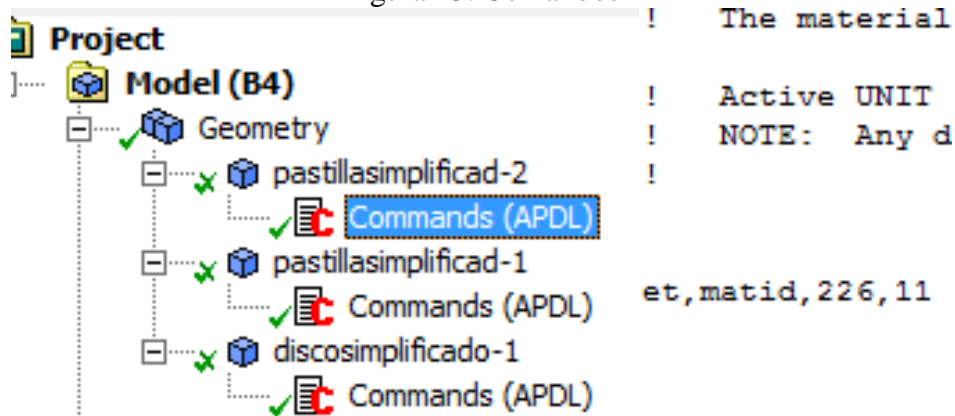
Figura 42. Ensamble disco y pastillas



Fuente: Autor

- *Creación del material:* El primer paso para el análisis mediante Ansys, es crear el material de los discos y pastillas de freno que se va a utilizar durante el estudio. Para ello utilizar la opción engineering data, donde se establecerá las propiedades de cada elemento.
- *Importar geometría:* El siguiente paso es importar el modelo realizado en SolidWorks hacia el programa Ansys, con la opción geometry. El modelo se puede crear también directamente en este programa, pero resulta más difícil su modelación, razón por la cual se crea los elementos en otro software.
- *Nuevo proyecto:* Se elige el proyecto estructural denominado Transient Structural, el cual permite analizar el comportamiento térmico entre disco y pastilla, además se calcula los esfuerzos, deformaciones y temperaturas producidos por la fricción entre estos elementos.
- *Geometría y asignación del material:* En esta fase se asigna el material anteriormente creado para cada elemento y los comandos `et,matid,226,11` que permite tomar en cuenta el grado de libertad térmico en el análisis.

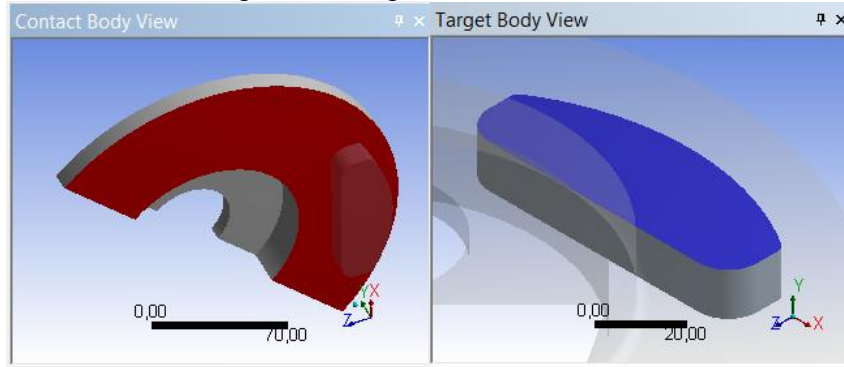
Figura 43. Comandos



Fuente: Autor

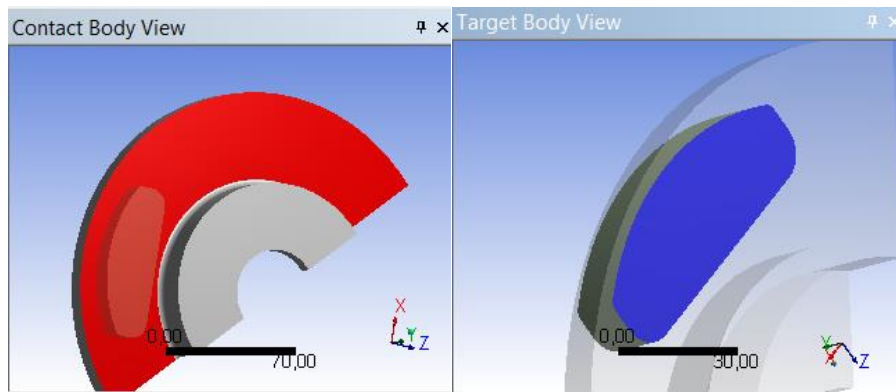
- *Configuración de contactos:* Define las regiones de contacto entre las caras de las pastillas y el disco de freno. De este modo se puede analizar los esfuerzos y temperaturas producidas en la superficie del disco. Se introducen las condiciones para los elementos en contacto, además de los comandos en cada región establecida. Se debe tener muy en cuenta el coeficiente de fricción entre las pastillas y el disco de freno para el análisis.

Figura 44. Regiones de contacto 1



Fuente: Autor

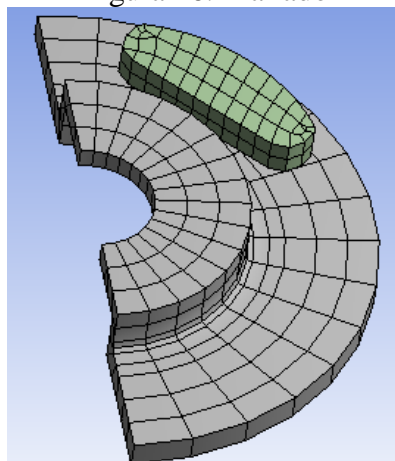
Figura 45. Regiones de contacto 2



Fuente: Autor

- *Mallado:* Para obtener un resultado confiable y preciso se procede a realizar el mallado del conjunto disco-pastillas, por defecto se crea una malla que para el estudio requerido no es aceptable, entonces se hace uso de una serie de opciones para refinarla hasta obtener la más adecuada.

Figura 46. Mallado



Fuente: Autor

- *Condiciones de borde térmico:* Hay que tener en cuenta que parte del conjunto se va a analizar para ubicar la condición de contorno, es decir limitar la región que se va a tomar para el estudio térmico y estructural.
- *Configuración de análisis:* Por razones del gran cálculo que debe realizar la máquina, se limita el tiempo de análisis a 0,2 segundos para obtener los resultados en un período corto de simulación.

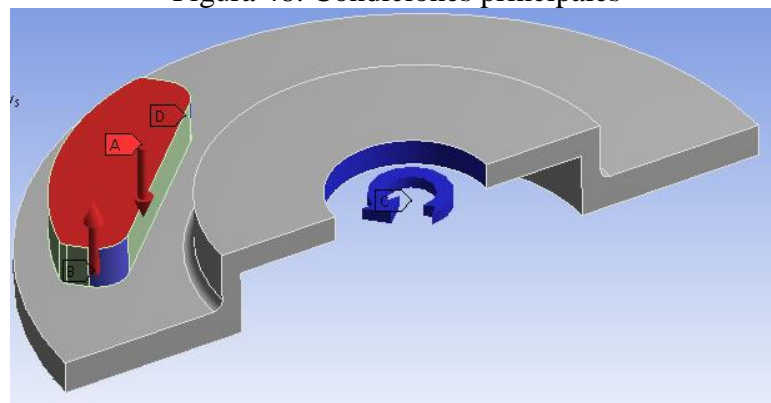
Figura 47. Configuración de análisis

Details of "Analysis Settings"	
[-] Step Controls	
Number Of Steps	1,
Current Step Number	1,
Step End Time	0,2 s
Auto Time Stepping	On
Define By	Time
Initial Time Step	1,e-002 s
Minimum Time Step	1,e-002 s
Maximum Time Step	5,e-002 s
Time Integration	On
[-] Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled

Fuente: Autor

- *Configuración de cargas y condiciones de contorno:* son todas aquellas condiciones que debe poseer el conjunto para realizar el estudio, entre estas se encuentra la fijación y las fuerzas aplicadas a las pastillas, los soportes, desplazamientos que se pueden producir, también la rotación del disco de freno que simula el vehículo en movimiento.

Figura 48. Condiciones principales



Fuente: Autor

3.3.6.2 *Proceso:* Es la parte en la que se da solución al problema planteado, el software resuelve las ecuaciones de cálculo y propone las soluciones.

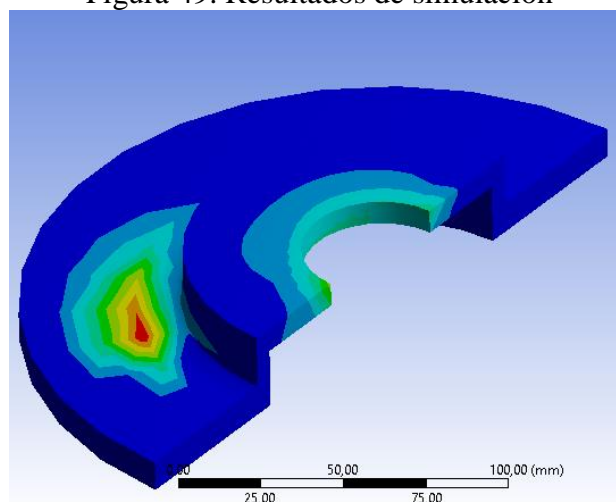
El programa selecciona el cálculo a realizar por ejemplo un análisis transitorio, modal, armónico, estático, etc.

Se configura los parámetros propuestos entre estos están intervalos de tiempo, número de iteraciones, entre otros.

El software para iniciar el cálculo, transfiere las condiciones planteadas como cargas, desplazamientos, velocidad de rotación, etc., hacia el elemento creado, se producen las matrices de rigidez, se resuelven ecuaciones para dar las soluciones.

3.3.6.3 *Post proceso:* Esta es la etapa final del análisis, donde se presentan todos los resultados del proceso anterior. Los datos finales pueden numéricos o gráficos, donde el analista debe hacer uso de sus conocimientos para analizar e interpretar los resultados obtenidos.

Figura 49. Resultados de simulación



Fuente: Autor

Con el procedimiento realizado se obtuvo varios resultados, dentro de los cuales se encuentran los esfuerzos y temperaturas producidas en el disco original por acción del contacto con las pastillas y se analizaron las mismas soluciones para el disco de freno alterno para estudiar el comportamiento de los materiales y sus diferencias durante su funcionamiento en un tiempo estimado de 0,2 segundos.

Los esfuerzos generados en la simulación utilizando el material de cada disco de freno tienen un valor máximo de 7 MPa, lo que indica que los repuestos originales y alternos mantienen buenas propiedades que responden eficientemente a estas exigencias por el contacto con las pastillas de freno. Hay que tener en cuenta que en un lapso mayor de tiempo los esfuerzos tienden a aumentar, pero por causas de ahorro computacional no se pudo ampliar este período.

Tabla 12. Esfuerzos en el disco original

Tiempo [s]	Mínimo [MPa]	Máximo [MPa]
2,e-002	5,5858e-002	3,9765
4,e-002	4,1026e-002	3,4504
6,e-002	1,9061e-002	4,2163
8,e-002	2,225e-002	7,0995
1,e-001	1,7328e-002	6,987
0,12	9,6141e-003	6,9385
0,14	8,5608e-003	6,9536
0,16	8,2097e-003	6,8799
0,18	8,0052e-003	6,763
0,2	7,7843e-003	6,6038

Fuente: Autor

Tabla 13. Esfuerzos disco alterno

Tiempo [s]	Mínimo [MPa]	Máximo [MPa]
2,e-002	6,6862e-002	4,1243
4,e-002	2,733e-002	3,5457
6,e-002	1,9655e-002	4,2328
8,e-002	2,2171e-002	6,4662
1,e-001	1,7209e-002	6,2202
0,12	9,3017e-003	6,0427
0,14	8,362e-003	5,9383
0,16	7,8795e-003	5,7615
0,18	7,2413e-003	5,5588
0,2	6,9833e-003	5,3301

Fuente: Autor

En el caso de la temperatura en el período de tiempo establecido ambos materiales alcanzan una temperatura máxima de 35,3 °C aproximadamente, varían una cantidad

mínima uno de otro, esta variable tiende a aumentar conforme pasa el tiempo, hasta llegar a sus temperaturas máximas de funcionamiento.

Tabla 14. Temperatura disco original

Tiempo [s]	Mínimo [°C]	Máximo [°C]
2,e-002	24,88	25,014
4,e-002	24,903	25,039
6,e-002	18,514	28,141
8,e-002	12,434	30,918
1,e-001	12,842	31,722
0,12	13,186	33,308
0,14	13,498	34,463
0,16	13,81	35,139
0,18	14,143	35,368
0,2	14,501	35,242

Fuente: Autor

Tabla 15. Temperaturas disco alterno

Tiempo [s]	Mínimo [°C]	Máximo [°C]
2,e-002	24,88	25,035
4,e-002	24,897	25,061
6,e-002	17,317	28,717
8,e-002	10,409	31,762
1,e-001	11,267	32,357
0,12	12,012	33,92
0,14	12,682	35,006
0,16	13,316	35,562
0,18	13,94	35,63
0,2	14,564	35,318

Fuente: Autor

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS COMPARATIVO

4.1 Espectrometría

En este ensayo se obtuvo los elementos que forman parte de los discos de freno, su influencia afecta de diferentes maneras al material, a continuación se detalla cada uno:

Carbono: Se encuentra en porcentajes mayores que los demás elementos, y puede fusionarse con el hierro para formar carburos o en su estado natural transformándose en grafito. Las características que brinda es mayor fluidez, incrementa la conductividad térmica, pero tiene la desventaja de disminuir la dureza y resistencia a la tensión.

Silicio: Suministra al material una mayor fluidez, es decir mayor capacidad para llenar el depósito o molde de la fundición cuando se encuentra en estado líquido, lo que influye para una buena solidificación con defectos mínimos, pero hace que el carbono forme el grafito desfavoreciendo la continuidad de la matriz del material, disminuyendo la resistencia y ductilidad, la ventaja es que en porcentajes adecuados ayuda a la formación de una matriz perlítica con propiedades mecánicas aceptables.

Manganeso: Es el encargado de reducir el efecto del azufre al combinarse con este y formar el sulfuro de manganeso, también aumenta la fluidez, resistencia y dureza. Es un estabilizador de la matriz perlítica, e impide la constitución del grafito en la fundición.

Titano: Favorece al proceso de grafitización, produce un material blando y favorece la formación de ferrita. Afina el grafito en la estructura.

Vanadio: Proporciona mayor dureza, afina el grafito y se opone a la grafitización de la estructura.

Estaño: Aumenta la formación de perlita.

Plomo: Degenera la formación de grafito y reduce la resistencia a la tracción.

Fósforo: El fósforo debe controlarse en contenido de las fundiciones grises para la obtención de buenas propiedades mecánicas. Incrementa la fluidez, dureza y grafitización, pero de igual manera la fragilidad lo que perjudica a la fundición por la aparición de fisuras o grietas.

Azufre: A mayor porcentaje incrementa la cantidad de carburos, tiene la posibilidad de reaccionar con el hierro y con el manganeso, con el primero forma el sulfuro de hierro donde se puede provocar fisuras cuando se somete a temperaturas altas, tiende a disminuir la fluidez y producir cavidades (aire atrapado) en el material. Generalmente este elemento se fusiona con el manganeso lo cual es una ventaja ya que así elimina las acciones producidas por el sulfuro de hierro.

Cromo: Aumenta la formación de carburos, reduce la maquinabilidad de la fundición, pero las ventajas que presenta este elemento es que proporciona gran resistencia, dureza y da propiedades de resistencia al calor y desgaste, dos variables que afectan directamente a los discos de freno.

Molibdeno: Incrementa la templabilidad y resistencia en caliente del material. La fragilidad es reducida por este elemento.

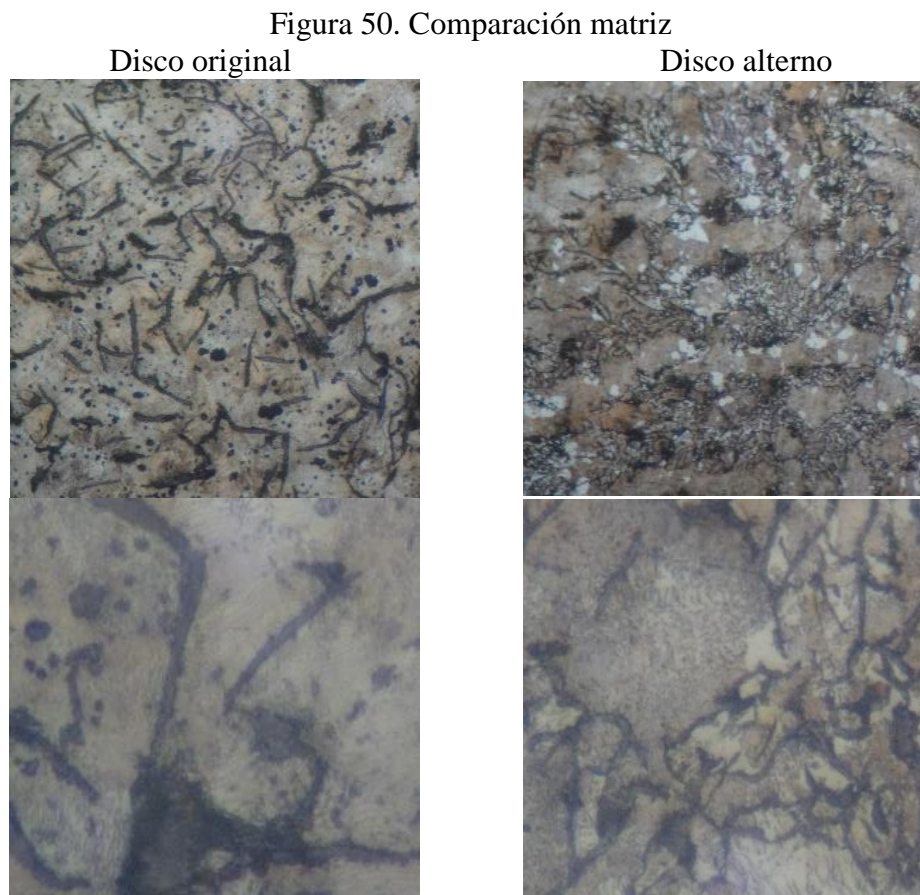
Cobre: Promueve la grafitización, aumenta la fragilidad de la estructura pero aumenta la resistencia a la corrosión.

Níquel: Tiene los mismos efectos del cobre y su particularidad es que permite una buena estabilización de la perlita llegando a tener una matriz netamente perlítica. Permite mayor resistencia y tenacidad.

4.2 Metalografía

Con el estudio metalográfico se analiza la matriz de la estructura interna de la fundición gris, esta puede ser perlítica, ferrítica o perlítica-ferrítica. Existen dos factores fundamentales para obtener los diferentes tipos de fundiciones, los cuales son la velocidad de enfriamiento y el tratamiento térmico, en el caso de los discos de freno su composición química varía en pequeños porcentajes en cuestión de los elementos que constituyen el material, la diferencia se encuentra en el proceso de fabricación de cada uno de ellos. La

matriz de la microestructura de los discos de freno es diferente, debido a los factores nombrados.



Fuente: Autor

Para el disco original, se observa una fundición gris con matriz perlítica, la cuál ofrece características diversas, la forma, tamaño y la distribución de las láminas de grafito afectan notablemente en las propiedades del material. Como se observa en la figura anterior, la distribución del grafito es homogénea por todo el material y en láminas cortas lo que reduce las tensiones internas, también da paso al desarrollo propiedades mecánicas como resistencia a la tracción, ductilidad, lo más importante y que se relaciona con los discos de freno es la gran resistencia al desgaste que da como resultado mayor durabilidad durante su funcionamiento. Para obtener la matriz perlítica se utiliza un enfriamiento moderado, donde el grafito y la perlita se juntan, brindando las características anteriormente nombradas, pero también reduce otras como la dureza, tenacidad, plasticidad, resistencia, etc. Otras particularidades del grafito es que sirve como lubricante reduciendo posibles agarrotamientos por el contacto entre disco pastillas, tiene una aceptable capacidad de absorción de vibraciones y buena maquinabilidad.

Por su parte el disco de freno alterno de marca Durako tiene una estructura perlítica ferrítica, en donde el grafito se presenta en forma de láminas largas lo que produce en el material menor resistencia mecánica, la presencia de ferrita en la estructura da lugar a un producto más débil y de menor dureza pero se obtiene una buena maquinabilidad. El origen de esta matriz está determinada principalmente por una velocidad de enfriamiento moderado a diferencia de la matriz perlítica por tal razón algunas propiedades como resistencia a la tracción, al desgaste, dureza, son menores que en la fundición gris perlítica. Los discos de freno alternos a pesar que sus propiedades no son mejores o iguales que en los discos originales, tienen características aceptables para un buen rendimiento en el sistema de frenos. Para mejorar las propiedades del material se puede realizar una serie de tratamientos térmicos como el recocido para mejorar la maquinabilidad y reducir tensiones, pero produce disminución de dureza y resistencia mecánica, el temple y revenido que aumentan tanto la resistencia mecánica como al desgaste, la dureza también es un factor que incrementa con este tratamiento.

4.3 Dureza

Al realizar el ensayo en las probetas de ambos discos de freno, se pudo calcular valores de dureza lo que dio como resultado una diferencia no muy amplia de 12 HB aproximadamente, es decir la dureza Brinell es similar en ambos elementos, siendo el material del disco original el de mayor dureza con 206,50 HB contra 194,63 del Alterno. Los valores especificados en la norma técnica colombiana para la dureza de los discos de freno comprenden un rango de 147 a 269 en la escala Brinell, al comparar los datos obtenidos de las pruebas y de la norma, se puede afirmar que ambos elementos cumplen con este requisito.

4.4 Ensayo de tracción

Con este ensayo se analiza la resistencia a la tensión de cada disco, es una propiedad importante para deducir el tipo de material a la que pertenecen. El valor promedio del disco original es de 250,77 MPa que puede resistir al estirarse antes de llegar a la fractura. Mientras que para el disco alterno tiene 185,36 MPa como resistencia a dicho esfuerzo. Igualmente se comparan estos valores con los de la norma técnica colombiana para analizar si los resultados están dentro de los rangos establecidos, que indica como valor mínimo a 120 MPa.

4.5 Clasificación de la fundición gris

Con los resultados de las pruebas anteriormente realizadas se puede deducir el tipo de fundición gris a la que pertenece cada elemento tomando en cuenta la norma ASTM A48 Especificación estándar para fundición de hierro gris y el manual de barras fundidas TUPY para hallar similitudes en las propiedades. Al analizar el disco de freno original mediante su microestructura se dedujo una matriz perlítica que junto con sus propiedades como dureza, resistencia a la tracción, densidad, se asemejan a la fundición clase 40 de la ASTM. Se realiza la comparación entre estos datos para revisar si concuerdan.

Tabla 16. Composición química de la fundición gris

Elemento	Disco original	ASTM Clase 40
Carbono (C)	3,406	2.95-3.30
Silicio (Si)	1,869	1.70-2.00
Manganeso (Mn)	0,596	0.50-0.9
Fósforo (P)	0,139	P≤0.15
Azufre (S)	0,056	S≤0.12
Hierro (Fe)	93,29	93,8

Fuente: Autor

Tabla 17. Comparación propiedades de fundición gris.

Propiedades	Disco de freno	ASTM clase 40
Resistencia a la tracción (Mpa)	250,77	276-293
Resistencia a la compresión (Mpa)	-	965
Dureza (HB)	206,50	200-235
Módulo elástico (Gpa)	-	110-138
Estructura	Perlítica-Grafito	Perlítica-Grafito

Fuente: Autor

De igual manera se examina las características del disco de freno alterno, que a pesar de tener similitud en los valores con el disco original, se diferencian principalmente en la microestructura, ya que este elemento tiene una matriz ferrítica perlítica, al realizar la comparación con la norma y catálogos anteriormente nombrados se define el material como una fundición ASTM clase 25. Algunos valores importantes se indican y comparan en la tabla siguiente.

Tabla 18. Composición química de la fundición gris

Elemento	Disco alterno	ASTM Clase 25
Carbono (C)	3,380	3,2 – 3,5
Silicio (Si)	2,121	1,6 - 2,4
Manganeso (Mn)	0,823	0,60 - 0,90
Fósforo (P)	0,167	P≤0.20
Azufre (S)	0,040	S≤0.15
Hierro (Fe)	92,82	93,2

Fuente: Autor

Tabla 19. Comparación propiedades de fundición gris.

Propiedades	Disco de freno	ASTM clase 25
Resistencia a la tracción (Mpa)	185,36	179
Resistencia a la compresión (Mpa)	-	669
Dureza (HB)	194,63	174
Módulo elástico (Gpa)	-	79-102
Estructura	Ferrítica- Perlítica	Ferrítica- Perlítica

Fuente: Autor

4.6 Desgaste

Mediante el ensayo se obtuvo los valores de desgaste por fricción entre discos y pastillas. Primero se analizó los repuestos originales, donde el desgaste promedio del disco es de 0,3 mm y de las pastillas 1,41 mm, durante un funcionamiento prolongado de veinte minutos a una presión del líquido de frenos de treinta psi, que supera ampliamente la resistencia de los repuestos alternos cuyos valores son 0,83 mm para el disco y 3,66 mm para las pastillas.

El contenido de las hojuelas de grafito con las que cuentan los discos en su microestructura tiene gran influencia en el desgaste que sufren, ya que estas funcionan como lubricante disminuyendo considerablemente el desgaste por el contacto con las pastillas de freno. Una cantidad de hojuelas baja en la estructura del material provoca menor lubricación y mayor desgaste, en los discos originales es notable su contenido, por lo que tiene mayor resistencia a la fricción, mientras que el alterno no cuenta con la misma cantidad, por lo que es más alto el porcentaje de pérdida de material. Aunque existen tales

diferencias, ambos repuestos tienen buenas características ante la acción de la fricción. El tiempo que duran los discos hasta llegar al límite del grosor señalado se determina por la forma como se utiliza el freno por parte del conductor y el material de los discos. Los resultados muestran que los discos originales tienen una durabilidad aproximadamente 3 veces mayor que los alternos.

Tabla 20. Desgaste discos de freno

Repuestos	Intervalo frenado (min)	Desgaste (mm)
Disco original	20	0,3
Disco alternativo	20	0,83

Fuente: Autor

Las pastillas de freno también presentan una diferencia significativa entre las originales y alternas, teniendo en cuenta que estas terminan su vida útil al desgastarse alrededor de 6 mm. La durabilidad de las pastillas originales es cerca del doble que las alternas.

Tabla 21. Desgaste pastillas de freno

Repuestos	Intervalo frenado (min)	Desgaste (mm)
Pastilla original	20	1,41
Pastilla alterna	20	3,66

Fuente: Autor

4.7 Simulación

Mediante el uso de software se logró simular el contacto entre disco y pastillas, dando como resultados los posibles esfuerzos y temperaturas alcanzadas durante esta acción. Al cargar las diferentes propiedades de cada material de los discos su respuesta en la simulación es similar es decir, el disco original y alternativo presentan las mismas respuestas ante el análisis planteado ya que sus propiedades principalmente térmicas no presentan variaciones importantes.

La diferencia entre ambos elementos no es significativa en cuanto a la resistencia a esfuerzos y altas temperaturas, pero a largo plazo conforme pasa el tiempo y se utiliza repetidas veces el sistema de frenos, se desarrollan pérdidas de las propiedades del material especialmente por las temperaturas alcanzadas en el frenado lo que provoca cada

vez menor resistencia a los esfuerzos, mayores deformaciones y desgaste que afecta no solo al disco sino también a las pastillas.

Tabla 22. Resultados simulación

Variables	Disco original	Disco alterno
Esfuerzo máximo	6,60 MPa	5,33 MPa
Temperatura máxima	35,24 °C	35,32 °C

Fuente: Autor

Los esfuerzos se generan principalmente en el centro de la superficie de contacto del disco aumentando con el pasar del tiempo pero que empiezan a estabilizarse a mitad del período de análisis, esto en ambos materiales. En el caso de la temperatura se observa un crecimiento constante lo cuál en la realidad en un lapso mayor incrementaría considerablemente la energía concentrada en los discos, lo que produciría mayores esfuerzos y producción de daños como fisuras, grietas, etc.

CAPÍTULO V

5. PRUEBA DE HIPÓTESIS

5.1 Hipótesis

Hipótesis nula (H_0): Los discos de freno originales tienen la misma resistencia a esfuerzos que los discos alternos durante su funcionamiento.

$$H_0: u_o = u_a$$

Hipótesis alternativa (H_1): Los discos de freno originales no tienen la misma resistencia a esfuerzos que los discos alternos durante su funcionamiento.

$$H_1: u_o \neq u_a$$

5.2 Nivel de significancia (α)

Se debe verificar la suposición seleccionando el nivel de significancia es decir la probabilidad que se rechace la hipótesis nula cuando esta es verdadera, los valores pueden variar entre 0 y 1. Un valor pequeño significa menor probabilidad de cometer un error de tipo 1, pero habrá mayor posibilidad de cometer un error tipo 2. El nivel de significancia seleccionado es de 0,05 con riesgo del 5%. (HERNÁNDEZ, 2010, pp. 307)

Error tipo 1: Probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando en realidad es verdadera.

Error tipo 2: Probabilidad de aceptar la hipótesis nula cuando en realidad es falsa.

5.3 Estadístico de prueba

Con los datos obtenidos se calcula el valor llamado estadístico de prueba, el cual determina si se rechaza la H_0 . Se utiliza la prueba t para el análisis de diferencia de grupo en el estudio. Antes del cálculo de P valor se debe ratificar la normalidad e igualdad de varianzas para realizar la prueba de hipótesis. (HERNÁNDEZ, 2010, pp. 319)

5.3.1 Normalidad: Es un método para verificar que la variable se comporta o distribuye normalmente, se utiliza la prueba Chapiro Wilk para un tamaño de muestra menor a treinta. El criterio a tomar a tomar en cuenta es el siguiente:

P valor $\geq \alpha$; los datos provienen de una distribución normal.

P valor $< \alpha$; los datos no provienen de una distribución normal.

5.3.2 Igualdad de varianzas: Los grupos deben tener igualdad de varianzas. Se demuestra mediante la prueba de levene, donde el criterio para analizar los resultados de la igualdad es:

P valor $\geq \alpha$; las varianzas son iguales.

P valor $< \alpha$; las varianzas contienen una diferencia significativa.

5.3.3 Cálculo de t valor: este valor es calculado mediante minitab, y es comparado con el encontrado en tablas según los grados de libertad y el nivel de significancia. Si el $t_{calculado}$ encuentra fuera del intervalo $(-t_{crítico}; +t_{crítico})$ se rechaza la hipótesis nula. El valor crítico se obtiene mediante la relación entre el nivel de significancia y los grados de libertad, este análisis se puede verificar mediante la gráfica de distribución t de student de dos colas. (HERNÁNDEZ, 2010, pp. 320)

Tabla 23. Distribución t student

α g.l	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.001
1	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	636.619
2	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	31.598
3	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	12.929
4	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	8.610
5	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	6.869
6	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.959
7	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	5.408
8	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	5.041
9	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.781
10	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.587
11	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.437
12	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	4.318
13	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	4.221
14	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	4.140
15	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	4.073
16	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	4.015
17	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.965
18	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.922
19	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.883
20	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.850
21	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.819
22	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.792
23	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.767
24	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.745
25	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.725
26	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.707
27	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.690
28	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.674
29	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.659
30	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.646

Fuente: <http://www.slideshare.net/Maicori/tabla-t-student-3372178>

5.3.4 Cálculo de P valor: Luego de corroborar la normalidad e igualdad de varianza se procede al cálculo del valor P para realizar la prueba de hipótesis con el siguiente criterio:

P valor $> \alpha$; se acepta la hipótesis nula y se rechaza la H_1 .

P valor $\leq \alpha$; Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la H_1 .

5.4 Toma de decisión

Este es el último paso que se realiza en la prueba de hipótesis y es donde se toma la decisión de rechazar o aceptar la hipótesis nula según los valores de t y P.

5.5 Análisis estadístico ensayo de desgaste

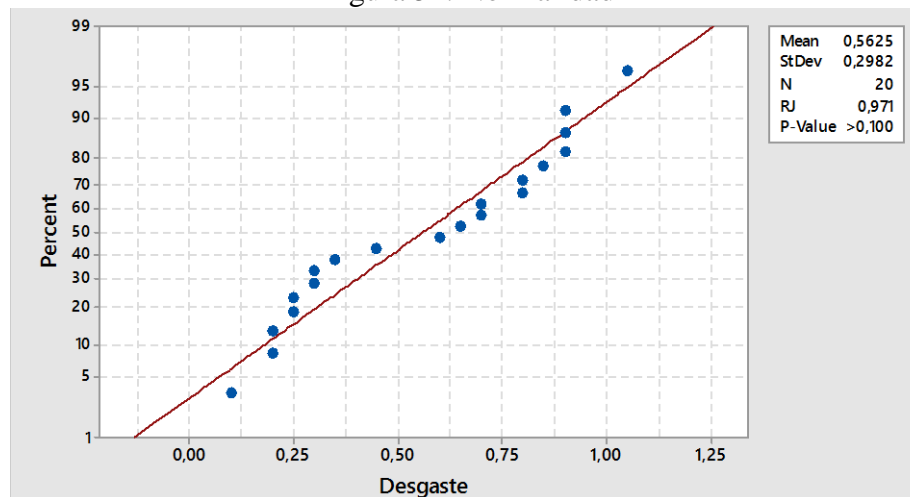
Hipótesis: $H_0: u_1 = u_2$

Nivel de significancia: $\alpha = 0,05$

$H_1: u_1 \neq u_2$

Estadístico de prueba

Figura 51. Normalidad



Fuente. Autor

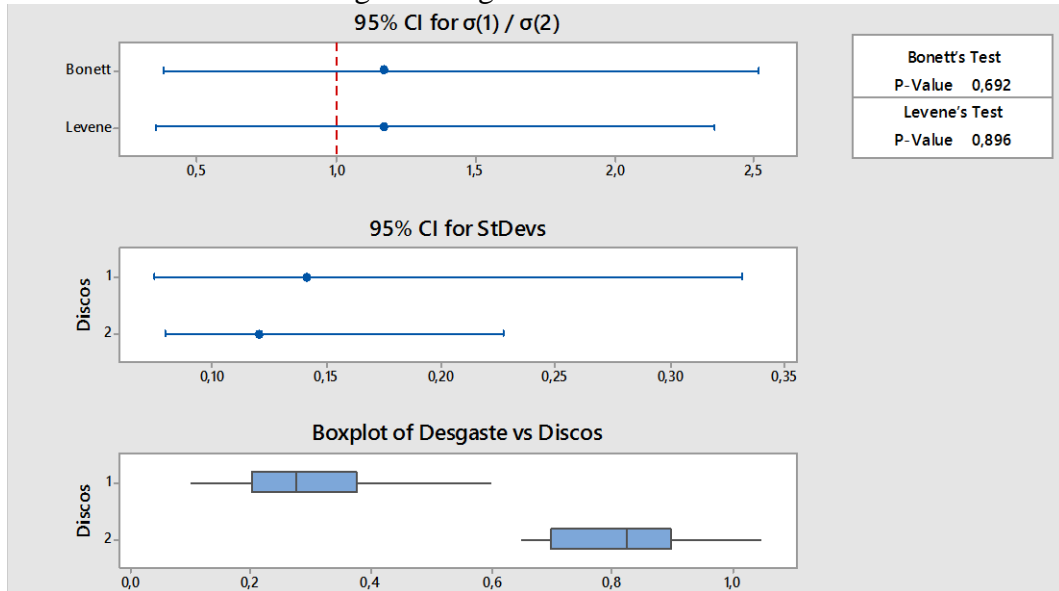
Tabla 24. Normalidad de variable

Grupos	P valor	Desigualdad	Nivel de significancia α
Discos	0,1	\geq	0,05

Conclusión: Como P valor de los datos de ambos discos de freno es mayor al nivel de significancia, si existe normalidad de variables.

Fuente: Autor

Figura 52. Igualdad de varianzas



Bonett's Test	
P-Value	0,692
Levene's Test	
P-Value	0,896

Fuente: Autor

Tabla 25. Igualdad de varianza

Grupos	P valor	Desigualdad	Nivel de significancia α
Discos	0,896	\geq	0,05

Conclusión: El valor P es mayor que el nivel de significancia por lo que sí existe igualdad de varianzas y se puede seguir con el proceso.

Fuente: Autor

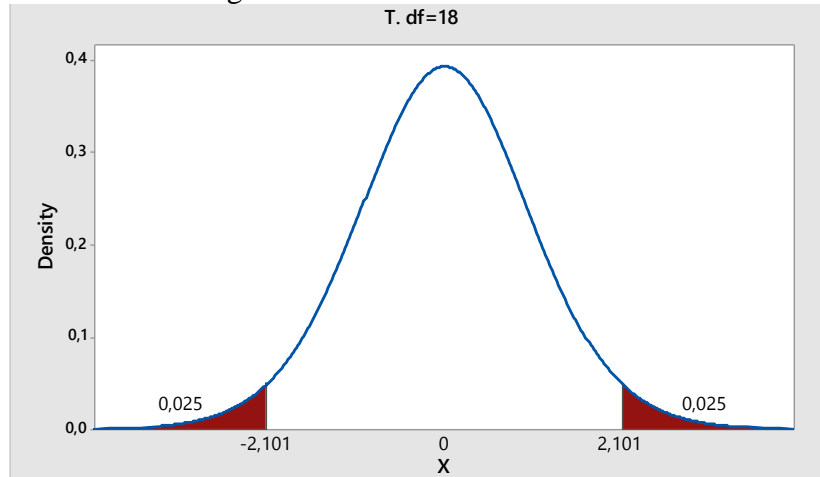
Comparación:

Tabla 26. Valores distribución t student

Valor T	
Tamaño muestra	20
GDL	$N-2 = 20-2 = 18$
$t_{critico}$	2,101
$t_{calculado}$	-8,93
Comparación	Fuera del intervalo
Valor P	
A	0,05
Valor P	0
Comparación	$0 < 0,05$

Fuente. Autor

Figura 53. Distribución t dos colas



Fuente: Autor

Toma de decisión: El valor t calculado se encuentra en la zona de rechazo de la H0 es decir, fuera del intervalo $(-t_{crítico}; +t_{crítico})$, por lo que se llega a la decisión de rechazar la H0 y acepta la H1.

Conclusión: al realizar la prueba estadística y analizar los datos se puede concluir que los discos originales tienen mayor resistencia al desgaste durante la acción de frenado en los vehículos Chevrolet Aveo.

5.6 Análisis estadístico de la dureza

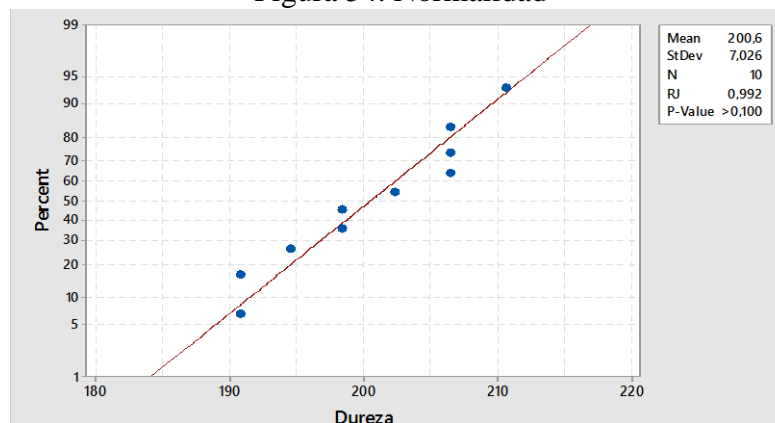
Hipótesis: $H_0: u_1 = u_2$

Nivel de significancia: $\alpha = 0,05$

$H_1: u_1 \neq u_2$

Estadístico de prueba

Figura 54. Normalidad



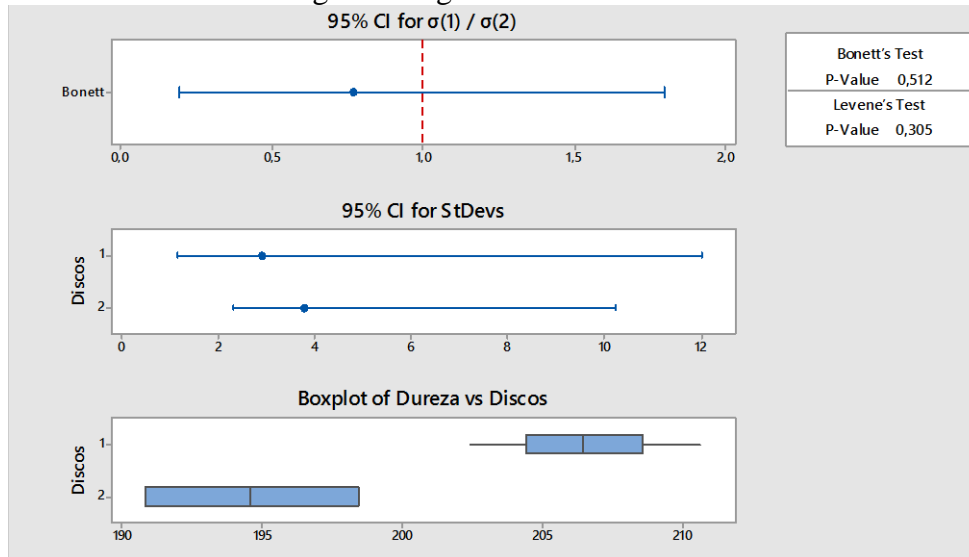
Fuente: Autor

Tabla 27. Normalidad de variables

Grupo	P valor	Desigualdad	Nivel de significancia α
Disco original	0,1	\geq	0,05
Conclusión: Existe normalidad entre los datos del ensayo de dureza de los discos de freno.			

Fuente: Autor

Figura 55. Igualdad de varianzas



Fuente: Autor

Tabla 28. Igualdad de varianza

Grupos	P valor	Desigualdad	Nivel de significancia α
Discos	0,305	\geq	0,05
Conclusión: El valor P de la prueba de Levene es mayor que el nivel de significancia, por tal razón existe igualdad de varianzas.			

Fuente: Autor

Comparación:

Tabla 29. Valores distribución t student. Continúa

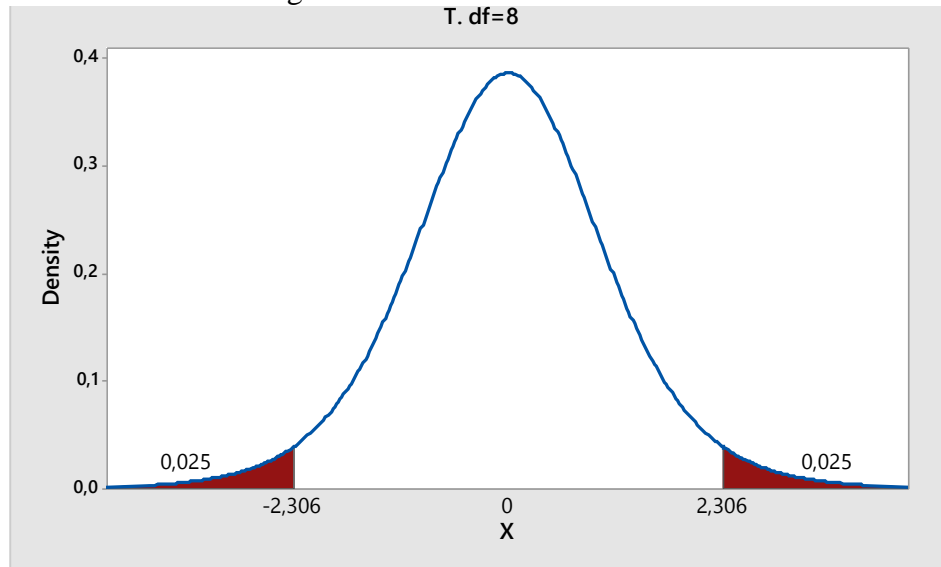
Valor T	
Tamaño muestra	10
GDL	$N-2 = 10-2 = 8$
$t_{critico}$	2,306
$t_{calculado}$	5,54
Comparación	Fuera del intervalo

Tabla 30. Valores distribución t student

Valor P	
α	0,05
Valor P	0,001
Comparación	$0,001 < 0,05$

Fuente: Autor

Figura 56. Distribución t dos colas



Fuente: Autor

Toma de decisión: Con esta comparación se llega a la conclusión de rechazar la hipótesis nula y aceptar la alternativa ya que el valor t calculado se encuentra fuera de la zona de aceptación de la H_0 .

Conclusión: Este análisis dio como resultado que si existe diferencia entre los discos originales y alternos en cuanto a dureza del material.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

La mayoría de los materiales se encuentran en porcentajes similares en los discos de freno, uno de los que varía en una cantidad considerable es el silicio, variable que precisa el tipo de matriz de la fundición gris, lo cual ayuda al proceso de grafitización con lo que mejora propiedades como la maquinabilidad pero también es productor de fisuras internas del material.

La microestructura de los discos de freno y sus propiedades se definen principalmente por la velocidad de enfriamiento y el porcentaje de silicio en el material, para el disco original se observó una matriz perlítica que contiene mejores propiedades como dureza, resistencia a la tensión y al desgaste que en el caso del disco alterno que contiene una matriz ferrítica perlítica.

Se analizó la dureza de cada material donde el disco original presenta un valor de 206,5 HB y el disco alterno 194,6 HB, los datos se encuentran dentro del promedio que deben poseer según la NTC 1783 que expresa un valor comprendido entre 147 a 269 HB.

El ensayo de tracción dio como resultado que el material del disco original ofrece mayor resistencia a la tensión con un valor promedio de 250,77 MPa frente a 185,36 MPa del disco alterno, esta diferencia está relacionada con la matriz de la estructura en cada elemento.

El análisis de desgaste realizado dio como resultado que los repuestos alternos sufren mayor pérdida de material que los repuestos originales bajo condiciones similares por lo cual se afirma que a largo plazo mayor durabilidad tienen los discos y pastillas originales.

Con el análisis transitorio estructural se evaluó los esfuerzos y temperaturas producidas en los discos de freno dando como resultado valores similares en ambos materiales. Para los esfuerzos se calculó un valor promedio de 5,83 MPa y para la temperatura 31,36 °C.

Mediante el análisis estadístico se concluye que los discos de freno originales poseen mayor resistencia a esfuerzos que los discos alternos durante su funcionamiento. Con esto se ratifica que los repuestos originales son más apropiados para su uso en los vehículos.

6.2 Recomendaciones

Efectuar la prueba espectrométrica varias veces para analizar la semejanza de datos, ya que si existe diferencias considerables, se debe calibrar la máquina de ensayos, de esta manera se obtendrá resultados más confiables.

Cumplir de forma precisa y ordenada los procedimientos establecidos en las normas de cada ensayo para garantizar resultados confiables de lo contrario se pueden presentar errores al final de las pruebas por lo que se debe volver a realizar el proceso desde el inicio.

Desarrollar un análisis que permita conocer las características térmicas precisas de cada material, con diferentes grados de temperatura y modos de enfriamiento para conocer el comportamiento bajo estas exigencias, ya que el calor es el principal elemento que produce la mayoría de los problemas en los discos de freno.

Se recomienda utilizar una computadora Workstation que es un instrumento de grandes prestaciones y mayor rendimiento que las computadoras personales que permite establecer condiciones mucho más precisas para realizar el análisis y de esta manera obtener resultados que se acerquen mucho más a la realidad.

Ampliar el estudio dinámico del contacto disco pastillas en software mediante el uso de herramientas como Explicit Dynamics y CFX que permiten establecer otras condiciones para un acercamiento mayor a la realidad.

BIBLIOGRAFÍA

ÁGUIDA, Eduardo; et al. *Sistemas de transmisión de fuerzas y trenes de rodaje*. Madrid-España: Paraninfo S.A., 2012, pp. 456-466.

ANDRINO, Juan. *Mecánica Y Entrenamiento Simple Del Automóvil*. España: DGT, 2011, pp. 113-114.

ANSYS. Thermal Analysis. [En línea] [Consultado: 23 de julio de 2016]. Disponible en: <http://www.ansys.com/Products/Structures/Thermal-Analysis>

ASTM E3-11: *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*.

ASTM E10-15: *Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*.

ASTM E8: *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*.

BAENA USUGA, Juan David, & FIGUEREDO VARÓN Karen. *Metalografía. Diagrama Hierro-Carbono*. [En línea] [Consultado: 8 de diciembre de 2016]. Disponible en: <http://blog.utp.edu.co/metalografia/5-diagrama-hierro-carbono/>

CENTRO ZARAGOZA. *Sistema De Frenos*. [En línea]. Zaragoza-España: SEAT, 2001. [Consultado: 2 de septiembre de 2016], pp. 20-40. Disponible en: <http://es.slideshare.net/juliobustinzal/manual-sistema-frenos-automoviles>

CUEVA JARAMILLO, Freily Rolando, & OCHOA CISNEROS Oliver Santiago. Análisis del comportamiento del material del disco de freno de un vehículo Chevrolet Aveo cuando está sometido a diversas temperaturas [En línea]. (Trabajo de titulación) (Ingeniería) Universidad Politécnica Salesiana, Facultad de Mecánica, Escuela de Ingeniería Automotriz, Cuenca, Ecuador. 2012, pp. 174. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/8938/1/UPS-CT005193.pdf>

DÍAZ, Felipe. *Tribología. Fricción, Desgaste Y Lubricación*. Lecturas de ingeniería N° 2, 2007, México pp. 3-11.

EUROMASTER. Mantenimiento Del Vehículo. *Pastillas De Freno*. [En línea] [Consultado: 23 de septiembre de 2016]. Disponible en: <http://www.euromaster-neumaticos.es/mecanica-rapida/frenos/pastillas-de-freno>

FRUM. *Manual Técnico. Tecnología En Frenos*. [En línea] [Consultado: 23 de julio de 2016]. pp. 34-35. Disponible en: <http://www.frum.com.br/manualtecnicoespanhol.pdf>

HERNÁNDEZ, R; et al. *Metodología de la investigación*. 5^{ta} ed. México: McGRAW-HILL, 2010, pp. 276-320.

HIBBELER, Russell. *Mecánica De Materiales*. 8^{va} ed. México: PEARSON EDUCACION, 2011, pp. 81-83.

KALPAKJIAN, Serope; SCHMID, Steven. *Manufactura, Ingeniería Y Tecnología. Fundamentos De Los Materiales: Su Comportamiento Y Propiedades De Manufactura.* 4^{ta} ed. México: Pearson Educación, 2002, pp. 68-113.

MANGONON, Pat. *Ciencia De Los Materiales, Selección Y Diseño.* 1^{ra} ed. México: Pearson Educación, 2001, pp. 129-519

METAL ACTUAL. *Procesos: Fundición Continua.* [En línea] [Consultado: 6 de octubre de 2016], pp. 16 Disponible en: http://www.metalactual.com/revista/10/procesos_fundición.pdf

JIMÉNEZ, Javier. Simulación numérica de fenómenos de inestabilidad en estructuras metálicas mediante Ansys [En línea]. (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Universidad de Sevilla, Facultad de Mecánica. Escuela de Ingeniería Industrial, Sevilla, España, 2010, pp. 71-73. Disponible en: <http://0-bibing.us.es.fama.us.es/proyectos/abreproy/4783/direccion/Vol+I.+CAP%C3%8DTULOS%252F>

MEYLE. *Daños Típicos De Discos De Freno Y Pastillas De Freno, Y Sus Causas.* [En línea] [Consultado: 23 de septiembre de 2016], pp. 8. Disponible en: http://www.meyle.com/fileadmin/user_upload/service/downloads/flyer/FLY_Schadensfaelle_Bremse_DinLang_12S_es_web.pdf.

NORTON, Robert. *Diseño De Elementos De Máquinas.* 4^{ta} ed. México: Pearson Educación, 2011, pp. 919-926.

NTC 1783. *Automotores. Discos Para Frenos En Fundición Gris.*

SAI, UMA. *Unidad de Espectrometría de Masas.* [En línea] [Consultado: 23 de julio de 2016]. Disponible en: <http://www.scai.uma.es/servicios/aqcm/ems/ems.html>

SEAT. *Manual Técnico De La Pastilla De Freno: Pastillas de frenos.* [En línea] [Consultado: 23 de septiembre de 2016]. Disponible en: <http://www.museo.seat.com/biblioteca/manuals%20varis/Manual%20tecnico%20pastillas%20freno.pdf>

SMITH, William; HASHEMI, Jabad. *Fundamentos De La Ciencia E Ingeniería De Materiales.* 4^{ta} ed. México: McGraw-Hill, 2006, pp. 262-268.

SORIA, Ricardo. *Aplicación De La Técnica Analítica De Espectrometría De Emisión.* ININ, México, pp. 35.