



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

**“ANÁLISIS DEL MECANISMO DE DESGASTE EN PASTILLAS DE  
FRENO DE MATERIAL COMPUESTO EN VEHÍCULOS  
UTILITARIOS”**

**Trabajo de integración curricular**

**Tipo:** Proyecto de investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

**AUTOR:**

**AGUIRRE LÓPEZ CÉSAR AUGUSTO**

Riobamba - Ecuador

2022



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

**“ANÁLISIS DEL MECANISMO DE DESGASTE EN PASTILLAS DE  
FRENO DE MATERIAL COMPUESTO EN VEHÍCULOS  
UTILITARIOS”**

**Trabajo de integración curricular**

**Tipo:** Proyecto de investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

**AUTOR:** CÉSAR AUGUSTO AGUIRRE LÓPEZ

**DIRECTOR:** ING. CRISTIAN DAVID REDROBÁN DILLON

Riobamba – Ecuador

2022

**©2022, César Augusto Aguirre López**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, **César Augusto Aguirre López**, declaro que el presente trabajo de integración curricular es de mi autoría, y que los resultados de éste 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 integración curricular. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Riobamba, 18 de febrero del 2022



**César Augusto Aguirre López**

CI. 094072212-7

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

El Tribunal del trabajo de integración curricular certifica que: El trabajo de integración curricular: Tipo: Proyecto de investigación: **ANÁLISIS DEL MECANISMO DE DESGASTE EN PASTILLAS DE FRENO DE MATERIAL COMPUESTO EN VEHÍCULOS UTILITARIOS**, realizado por el señor: **CÉSAR AUGUSTO AGUIRRE LÓPEZ**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de integración curricular, El mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

**FIRMA**

**FECHA**

Ing. Marco Antonio Ordoñez Viñan Mgs.



**epoch**  
Facultad de Mecánica  
Carrera de Mantenimiento Industrial

MARCO ANTONIO  
ORDONEZ VINAN

2022-02-18

**PRESIDENTE DE TRIBUNAL**

Ing. Cristian David Redrobán Dillon Mgs.

CRISTIAN  
DAVID  
REDROBAN  
DILLON

Firmado digitalmente por CRISTIAN  
DAVID REDROBAN DILLON  
DN: cn=CRISTIAN DAVID  
REDROBAN DILLON, gm=CRISTIAN  
DAVID, ou=EC-HROBAMBA,  
ou=Certificado de Clase 2 de Persona  
Física EC (FIRMA)  
e=cristianredroban@gmail.com  
Motivo: Soy el autor de este documento  
Ubicación:  
Fecha: 2022-04-29 17:42:05:00

2022-02-18

**DIRECTOR DE TRABAJO DE  
INTEGRACIÓN CURRICULAR**

Ing. Edison Fernando Calderón Freire Mgs.



Firmado electrónicamente por:  
**EDISSON FERNANDO  
CALDERON FREIRE**

2022-02-18

**MIEMBRO DE TRABAJO DE  
INTEGRACIÓN CURRICULAR**

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar el presente trabajo principalmente a Dios, por ser el inspirador y darnos fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados. A mi madre, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años. A mis docentes que me abrieron las puertas y aportaron con sus conocimientos en lo largo de mi formación académica.

**César Augusto Aguirre  
López**

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi gratitud a Dios, quien con su bendición llena siempre mi vida, a mi madre por ser mi pilar fundamental y haberme apoyado incondicionalmente, pese a las adversidades e inconvenientes que se presentaron, quienes me brindaron paciencia y sabiduría para culminar con éxito mis metas propuestas.

Agradezco a todos docentes que a lo largo de la carrera han compartido su sabiduría, conocimiento y apoyo, motivaron a desarrollarme como persona y profesional en la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo.

**César Augusto Aguirre  
López**

## TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
TABLA DE CONTENIDO.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
SUMMARY .....	xv
INTRODUCCIÓN .....	1

## CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	3
1.1. Sistemas de frenado.....	3
1.2. Definición de frenos.....	4
1.3. Tipos de sistemas de frenos.....	4
1.3.1. <i>Sistema de freno mecánico</i> .....	4
1.3.2. <i>Sistema de freno hidráulico</i> .....	5
1.3.2.1. <i>Servofreno</i> .....	7
1.3.3. <i>Sistema de freno neumático</i> .....	7
1.4. Tipos de frenos.....	8
1.4.1. <i>Freno de tambor</i> .....	9
1.4.2. <i>Freno magnético</i> .....	9
1.4.3. <i>Freno de disco</i> .....	10
1.4.3.1. <i>Discos</i> .....	11
1.4.3.2. <i>Mordazas (calipers) o pinzas</i> .....	11
1.4.3.3. <i>Pistones o cilindros</i> .....	12
1.5. Materiales del freno de disco.....	12
1.6. Pastillas de freno.....	13
1.6.1. <i>Características generales de las pastillas de frenos</i> .....	14
1.6.1.1. <i>Composición de las pastillas de freno</i> .....	14
1.6.1.2. <i>Componentes de las pastillas de freno</i> .....	16
1.6.1.3. <i>Fabricación</i> .....	17
1.6.2. <i>Tipos de pastillas de freno</i> .....	19

1.6.2.1.	<i>Cerámicas</i> .....	19
1.6.2.2.	<i>Orgánicas</i> .....	20
1.6.2.3.	<i>Semi metálicas, bajo metal o metálicas</i> .....	20
1.6.3.	<b><i>Evaluación de daños en pastillas de freno de disco</i></b> .....	21
1.6.3.1.	<i>Desprendimiento del material de la pastilla por corrosión</i> .....	21
1.6.3.2.	<i>Desprendimiento de material por alto grado de oxidación</i> .....	21
1.6.3.3.	<i>Desprendimiento del material de la pastilla por destrucción térmica</i> .....	22
1.6.3.4.	<i>Desprendimiento del material de la pastilla por influencias mecánicas</i> .....	22
1.6.3.5.	<i>Desprendimiento del material de la pastilla por producción defectuosa</i> .....	23
1.6.3.6.	<i>Daños provocados por el uso generando grietas superficiales</i> .....	23
1.6.3.7.	<i>Daños provocados por el uso generando roturas de los bordes</i> .....	24
1.6.3.8.	<i>Daños provocados por el uso patrón de contacto defectuoso</i> .....	24
1.6.3.9.	<i>Daños en pastillas de freno de disco por error de montaje</i> .....	25
1.6.3.10.	<i>Daños por influencias medioambientales</i> .....	25
1.7.	<b>Materiales compuestos</b> .....	26
1.7.1.	<b><i>Elementos de un material compuesto</i></b> .....	26
1.7.1.1.	<i>Matriz</i> .....	27
1.7.1.2.	<i>Refuerzos</i> .....	27
1.7.1.3.	<i>Interfase matriz-refuerzo</i> .....	28
1.7.2.	<b><i>Clasificación de los materiales compuestos</i></b> .....	28
1.7.2.1.	<i>Materiales compuestos reforzados con fibras</i> .....	28
1.8.	<b>Desgaste en pastillas de freno</b> .....	29
1.8.1.	<b><i>Mecanismos de desgaste</i></b> .....	29

## CAPÍTULO II

2.	<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	33
2.1.	<b>Criterios de inclusión</b> .....	33
2.2.	<b>Criterios de exclusión</b> .....	33
2.3.	<b>Metodología de búsqueda</b> .....	33
2.4.	<b>Análisis de los artículos</b> .....	35
2.5.	<b>Análisis de resultados de artículos con mayor categorización</b> .....	41
2.5.1.	<b><i>Investigación sobre el rendimiento de frenado y el mecanismo de desgaste de pares de frenos completamente de carbono/cerámicos</i></b> .....	41
2.5.1.1.	<i>Preparación de pares de frenos</i> .....	41
2.5.1.2.	<i>Pruebas de frenado</i> .....	42

2.5.1.3.	<i>Resultados de el rendimiento de frenado y el mecanismo de desgaste de pares de freno</i>	44
2.5.2.	<i>Sistema pastilla-disco de frenado: Mecanismos de desgaste y formación de fragmentos de desgaste</i>	45
2.5.2.1.	<i>Materiales y procedimientos en el sistema pastilla - disco</i>	46
2.5.2.2.	<i>Resultados del sistema pastilla-disco de frenado</i>	48
2.5.3.	<i>Falla inducida por desgaste de frenos de disco automotrices</i>	50
2.5.3.1.	<i>Materiales y métodos utilizados en la falla inducida por desgaste</i>	50
2.5.3.2.	<i>Antecedentes del caso</i>	51
2.5.3.3.	<i>Resultados de la falla inducida por desgaste de frenos de disco</i>	51
2.5.4.	<i>Un estudio de los mecanismos de desgaste de las pastillas de freno de disco y zapata</i>	54
2.5.4.1.	<i>Procedimiento experimental</i>	54
2.5.4.2.	<i>Resultados de los mecanismos de desgaste de las pastillas de freno de disco y zapata</i>	56
2.5.5.	<i>Análisis micro estructural y rendimiento de desgaste del compuesto de SiC reforzado con fibra de carbono para pastillas de freno</i>	61
2.5.5.1.	<i>Preparación de la muestra</i>	61
2.5.5.2.	<i>Pruebas de fricción y desgaste</i>	62
2.5.5.3.	<i>Resultados del análisis micro estructural y rendimiento de desgaste del SiC</i>	63
2.6.	<b>Evaluación de la calidad de las referencias de los artículos</b>	65
2.6.1.	<i>Microestructura y propiedades de los materiales de freno de carbono / carburo de silicio perforados en 3D</i>	65
2.6.2.	<i>Medición de la temperatura de flash durante el proceso de fricción seca a alta velocidad de deslizamiento</i>	65
2.6.3.	<i>Integración de discos de freno cerámicos en sistemas de frenos automotrices</i>	66
2.6.4.	<i>Fricción y desgaste de pastillas de freno metálicas sinterizadas en un disco de freno compuesto C / C-SiC</i>	66
2.6.5.	<i>Evaluación del rendimiento de fricción de los materiales de las pastillas de freno de nuevo diseño</i>	67
2.6.6.	<i>Compuestos como materiales de fricción: desarrollos recientes en materiales de fricción reforzados con fibra sin amianto</i>	68
2.6.7.	<i>Resistencia al desgaste de hierros fundidos utilizados en rotores de discos de freno</i>	68
2.6.8.	<i>Análisis de los mecanismos de iniciación y propagación de fisuras por fatiga en discos de freno</i>	69
2.6.9.	<i>Texturizado superficial con láser de fundición gris para mejorar el</i>	

	<i>comportamiento tribológico</i> .....	69
2.6.10.	<i>Formación de la tercera capa en pastillas de freno y rotores</i> .....	70
2.6.11.	<i>Mecanismo de formación y desgaste de tribo-óxidos y régimen de desgaste oxidativo del acero</i> .....	71
2.6.12.	<i>Rendimiento de fricción de los frenos compuestos cerámicos de carbono / carburo de silicio en entornos de aire ambiente y agua pulverizada</i> .....	72
2.6.13.	<i>Mecanismos de desgaste de los materiales de freno C / SiC</i> .....	72
2.6.14.	<i>Preparación y comportamiento de fricción de compuestos de matriz de carburo de silicio reforzados con fibra de carbono</i> .....	73
2.7.	<b>Comparativa de artículos científicos</b> .....	74

### CAPÍTULO III

3.	<b>MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b> .....	75
3.1.	<b>Organización de la información</b> .....	75
3.1.1.	<i>Factor-H</i> .....	75
3.1.2.	<i>Indicador SCImago Journal Rank</i> .....	77
3.1.3.	<i>Cuartiles</i> .....	78
3.1.4.	<i>Países que investigan el desgaste en pastillas de freno</i> .....	79
3.2.	<b>Discusión de resultados</b> .....	80
3.3.	<b>Dinámica del frenado</b> .....	81

	<b>CONCLUSIONES</b> .....	84
--	---------------------------	----

	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	85
--	------------------------------	----

### BIBLIOGRAFÍA

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1:</b> Características de materiales reforzados con fibras.....	29
<b>Tabla 1-2:</b> Artículos científicos extraídos.....	35
<b>Tabla 2-2:</b> Condiciones de prueba de SAE-J2522 .....	43
<b>Tabla 3-2:</b> Esquema de prueba basado en subsecciones de SAE - J2522 .....	43
<b>Tabla 4-2:</b> Densidad y porosidad abierta de discos y pastillas de freno .....	44
<b>Tabla 5-2:</b> Composición de elementos de los restos de desgaste adquiridos de SD-SP .....	45
<b>Tabla 6-2:</b> Composición de elementos de los restos de desgaste adquiridos de SD-FP .....	45
<b>Tabla 7-2:</b> Composición elemental del material de la pastilla de freno medidos por XRF .....	46
<b>Tabla 8-2:</b> Concentraciones de los compuestos en el material de las pastillas de freno .....	47
<b>Tabla 9-2:</b> Parámetros detallados de la prueba de desgaste pin-on-disc .....	49
<b>Tabla 10-2:</b> Análisis químico en diferentes zonas .....	57
<b>Tabla 11-2:</b> Condiciones de prueba de fricción y desgaste.....	63
<b>Tabla 12-2:</b> Comparativa de artículos científicos .....	74

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b> Clasificación de los sistemas de freno .....	3
<b>Figura 2-1:</b> Despiece de freno de disco de soporte fijo y dos cilindros .....	4
<b>Figura 3-1:</b> Distribución de un freno del tipo mecánico .....	5
<b>Figura 4-1:</b> Esquema de un sistema de freno hidráulico .....	6
<b>Figura 5-1:</b> Esquema de freno hidráulico.....	6
<b>Figura 6-1:</b> Servofreno.....	7
<b>Figura 7-1:</b> Sistema de aire comprimido.....	8
<b>Figura 8-1:</b> Freno de tambor .....	9
<b>Figura 9-1:</b> Disco de freno magnético .....	10
<b>Figura 10-1:</b> Elementos del sistema de freno de disco.....	10
<b>Figura 11-1:</b> Componentes del freno de disco .....	11
<b>Figura 12-1:</b> Tipos de discos.....	11
<b>Figura 13-1:</b> Caliper.....	12
<b>Figura 14-1:</b> Pistón .....	12
<b>Figura 15-1:</b> Pastillas de freno .....	14
<b>Figura 16-1:</b> Soporte metálico .....	16
<b>Figura 17-1:</b> Diseño convencional .....	17
<b>Figura 18-1:</b> Lámina anti ruido.....	17
<b>Figura 19-1:</b> Desprendimiento de los bordes.....	21
<b>Figura 20-1:</b> Alto grado de oxidación.....	22
<b>Figura 21-1:</b> Pastilla dañada por destrucción térmica.....	22
<b>Figura 22-1:</b> Pastilla dañada por influencias mecánicas .....	23
<b>Figura 23-1:</b> Pastilla dañada por producción defectuosa .....	23
<b>Figura 24-1:</b> Grietas superficiales en pastillas de freno.....	24
<b>Figura 25-1:</b> Rotura en los bordes de pastillas de freno.....	24
<b>Figura 26-1:</b> Pastilla con patrón de contacto insuficiente .....	24
<b>Figura 27-1:</b> Marca visible en la placa de soporte de la pastilla .....	25
<b>Figura 28-2:</b> Formación de impurezas en la superficie del revestimiento .....	25
<b>Figura 29-1:</b> Elementos que componen un material compuesto .....	26
<b>Figura 30-1:</b> Clasificación de los materiales compuestos .....	28
<b>Figura 31-1:</b> Proceso de fatiga por contacto .....	30
<b>Figura 32-1:</b> Desgaste abrasivo de los cuerpos.....	30
<b>Figura 33-1:</b> Ocurrencia de desgaste .....	31
<b>Figura 34-1:</b> Desgaste adhesivo entre dos piezas en movimiento .....	32

<b>Figura 1-2:</b>	Diagrama del dinamómetro e imagen real del disco de freno.....	42
<b>Figura 2-2:</b>	Variación del COF promedio en diferentes secciones de prueba .....	44
<b>Figura 3-2:</b>	Muestra de pasador de pastilla de freno. ....	47
<b>Figura 4-2:</b>	Dimensiones del pasador y del soporte del pasador.....	48
<b>Figura 5-2:</b>	Distancia de deslizamiento en función del coeficiente de fricción .....	49
<b>Figura 6-2:</b>	Imágenes ópticas del disco.....	51
<b>Figura 7-2:</b>	Imágenes de las grietas en la superficie del disco de freno.....	51
<b>Figura 8-2:</b>	Imágenes de microscopio óptico.....	52
<b>Figura 9-2:</b>	Imágenes de microscopio (SEM) de la grieta .....	52
<b>Figura 10-2:</b>	Imágenes SEM de la superficie de fractura en el disco .....	53
<b>Figura 11-2:</b>	Análisis EDS de las partículas de óxido .....	53
<b>Figura 12-2:</b>	Perfilometría de dureza a través de la fisura .....	54
<b>Figura 13-2:</b>	Extracción de la almohadilla de la zapata.....	55
<b>Figura 14-2:</b>	(a) Pastillas sin uso y (b) con 8 meses de uso .....	55
<b>Figura 15-2:</b>	(a) Almohadilla para zapatas sin usar y (d) desgastada .....	56
<b>Figura 16-2:</b>	Imagen SEM de la superficie sin usar de la almohadilla del disco .....	56
<b>Figura 17-2:</b>	Daños por desgaste de la almohadilla del disco.....	57
<b>Figura 18-2:</b>	Daños por desgaste de la almohadilla del disco en diferente zona .....	58
<b>Figura 19-2:</b>	Daños por desgaste en la zapata.....	58
<b>Figura 20-2:</b>	Grietas y surcos en la superficie en zapata desgasta .....	59
<b>Figura 21-2:</b>	Grietas y surcos en la superficie en zapata desgasta en diferentes zonas .....	59
<b>Figura 22-2:</b>	Perfiles 3D AFM de pastillas de disco .....	60
<b>Figura 23-2:</b>	Perfiles 3D AFM de zapata de freno.....	60
<b>Figura 24-2:</b>	(a) Microestructura de C / C-SiC y (b) Fibra de carbono y SiC .....	62
<b>Figura 25-2:</b>	Diagrama esquemático del tribómetro de bola sobre disco .....	62
<b>Figura 26-2:</b>	Variación del coeficiente de fricción respecto a temperaturas.....	64
<b>Figura 27-2:</b>	Desgaste del compuesto C / C-SiC deslizado contra acero AISI52100 .....	64

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-1:</b> Composición de los materiales de fricción.....	16
<b>Gráfico 1-3:</b> Revistas vs Factor –H.....	76
<b>Gráfico 2-3:</b> Revistas vs Indicador SJR .....	77
<b>Gráfico 3-3:</b> Revistas vs Cuartiles .....	78
<b>Gráfico 4-3:</b> Países vs artículos científicos.....	79

## RESUMEN

En el presente proyecto técnico de integración curricular: “Análisis del mecanismo de desgaste en pastillas de freno de material compuesto en vehículos utilitarios”. Se lo desarrolló mediante la investigación a los diferentes artículos científicos, encontrados en bases de datos certificadas de manera online. Para la correcta metodología se seleccionó un número considerable de artículos científicos que tengan concordancia con el tema a estudiar, se utilizaron las bases de datos como Scopus, Web of Science y Dialnet que tienen información científica sobre ingeniería y afines. Luego se realizó una categorización con los artículos extraídos y se extrajo un número reducido para seguidamente extraer información importante de su metodología, equipos, materiales, coeficiente de fricción y mecanismos de desgaste. Seguido se extrajo breve información de las referencias de los artículos científicos con mayor categorización para obtener una calidad alta respecto a sus referencias. Finalmente se realizó una comparativa en estos artículos científicos para tener una idea de que varía en cada estudio de un artículo científico con el otro. Los resultados de estudio se obtuvieron mediante la realización de gráficas simples mostrando datos referentes al Factor-H, indicador SJR y cuartiles en la página web Scimago Journal & Country Rank, también se realizó una gráfica acerca de los países en los cuales se publicaron dichos artículos científicos para tener una idea clara de cuáles son los que realizan investigaciones acerca de materiales y métodos para analizar el desgaste de las pastillas de freno en vehículos utilitarios. Se concluye que este trabajo de integración curricular aporta en la búsqueda de información en lo que respecta a los mecanismos de desgaste en los vehículos utilitarios y a los materiales que se utilizan en las pastillas de freno. Se recomienda realizar más investigaciones con otros tipos de materiales aditivos a las pastillas de freno.

**PALABRAS CLAVE:** <PASTILLAS DE FRENOS>, <DISCOS DE FRENO>, <MECANISMO DE DESGASTE>, <COEFICIENTE DE FRICCIÓN>, <MATERIALES COMPUESTOS>, <CERÁMICOS>, <VEHÍCULOS UTILITARIOS>, <COMPARATIVA>.



Firmado electrónicamente por:  
**HOLGER GERMAN  
RAMOS UVIDIA**

0679-DBRA-UPT-2022  
2022-04-13

## SUMMARY

This technical project of curricular integration: "Analysis of the mechanism of wear in brake pads of composite material in utility vehicles" was developed through research to the different scientific articles, found in databases certified online. For the correct methodology, a considerable number of scientific articles were selected that have agreement with the topic to be studied, databases such as Scopus, Web of Science and Dialnet that have scientific information on engineering and related were used. Then a categorization was made with the extracted articles and a small number was extracted to then extract important information about their methodology, equipment, materials, coefficient of friction and wear mechanisms. Then brief information was extracted from the references of the scientific articles with greater categorization to obtain a high quality with respect to their references. Finally, a comparison was made in these scientific articles to get an idea that it varies in each study from one scientific article to the other. The results of the study were obtained by making simple graphs showing data referring to the H-Factor, SJR indicator and quartiles on the Scimago Journal & Country Rank website, a graph was also made about the countries in which these scientific articles were published to have a clear idea of which are those that carry out research on materials and methods to analyze the wear of brake pads in utility vehicles. It is concluded that this work of curricular integration contributes to the search for information regarding the mechanisms of wear in utility vehicles and the materials used in brake pads. Further research is recommended with other types of materials additive to brake pads.

**KEYWORDS:** <BRAKE PADS>, < BRAKE DISCS>, <WEAR MECHANISM>, <FRICTION COEFFICIENT>, <COMPOSITE MATERIALS>, <CERAMICS>, <UTILITY VEHICLES>, <COMPARISON>.

SANDRA  
PAULINA  
PORRAS  
PUMALEMA



Firmado  
digitalmente por  
SANDRA PAULINA  
PORRAS PUMALEMA  
Fecha: 2022.04.18  
10:30:13 -05'00'

# **INTRODUCCIÓN**

## **Antecedentes**

La principal función de un sistema de frenos es la de disminuir o anular progresivamente la velocidad del vehículo hasta detenerlo, o mantenerlo inmovilizado.

En el año 1918, un joven inventor, Malcolm Lougheed, aplicó fuerza hidráulica al sistema de frenos. Empleando cilindros y tubos para transmitir la presión de un líquido contra las zapatas de los frenos y empujar ésta a los tambores.

En 1921 apareció el primer auto de pasajeros equipado con frenos hidráulicos en las cuatro ruedas: el Duesenberg Modelo A.

Pero el sistema hidráulico no fue adoptado de inmediato por todos los fabricantes de automóviles. Diez años después de aparecer el Duesenberg Modelo A, en 1931, sólo los modelos Chrysler, Dodge, Desoto, Plymouth, Auburn, Franklin, Reo y Granham equipados con frenos hidráulicos. De hecho, no fue hasta 1939 que la Ford finalmente los adoptó, convirtiéndose en el último fabricante de importancia en emplear frenos hidráulicos. El sistema básico de frenos que se utiliza hoy ya era cosa común en 1921, cuando también comenzó a usarse en un refinamiento que muchos consideran como algo contemporáneo: los frenos motrices.

El sistema de frenado hidráulico es una aplicación del principio de Pascal: ejerce una fuerza con el pie en un émbolo pequeño, el fluido la transmite y, según la relación entre las secciones de los émbolos. También cambia la dirección y el sentido la fuerza aplicada. (Grefa Lenin, 2015, p.1)

## **Justificación y actualidad**

Los sistemas de seguridad sistema de frenos del vehículo han evolucionado con el transcurso del tiempo creando sistemas más eficaces que permiten realizar conducciones mucho más confiables y veloces, un vehículo en condiciones de diseño correctas permite brindar la seguridad de manejo necesaria, pero un sistema que no esté dentro de los parámetros establecidos o un conductor que no de una buena utilización de este sistema está muy propenso a diversas ocasiones de peligro.

En esta investigación se exponen y se estudian uno de los elementos de seguridad del automóvil, como es el sistema de frenos y una mejora adicional al mismo para mejorar su uso controlar la temperatura óptima de funcionamiento y por ende mantener en condiciones estables el sistema y

evitar accidentes.

## **Problema**

En la actualidad el desarrollo tecnológico a nivel industrial avanza vertiginosamente generando en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo una exigencia de nivel de destreza intelectual en sus estudiantes. La problemática consiste en que existe un índice alto de mantenimiento correctivo en las pastillas de freno en los vehículos por esta razón se realiza un análisis comparativo sobre el desgaste en los diferentes artículos científicos estudiados y así saber qué tipo de materiales son los adecuados para evitar el prematuro desgaste en pastillas de freno en vehículos utilitarios. Teniendo en cuenta que otros factores importantes que inciden en el desgaste son la topografía no uniforme y el uso inadecuado que el conductor le da a su vehículo al momento del frenado.

## **Objetivos**

### ***Objetivo general***

Realizar un análisis del mecanismo de desgaste en pastillas de freno de material compuesto en vehículos utilitarios.

### ***Objetivos específicos***

Identificar claramente los elementos que conforman una pastilla de material compuesto para vehículos utilitarios.

Investigar los principales mecanismos de desgaste que se generan durante el frenado con pastillas de material compuesto.

Analizar comparativamente entre los diferentes artículos científicos estudiados sobre que métodos, materiales y coeficiente se utilizó.

# CAPÍTULO I

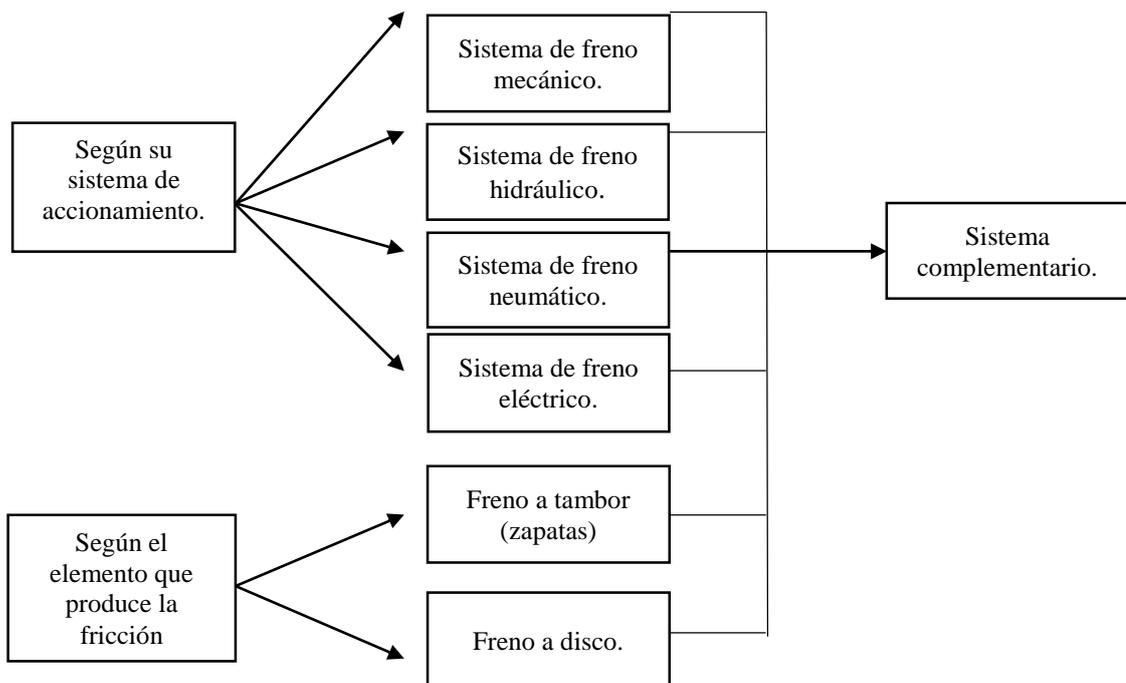
## 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

### 1.1. Sistemas de frenado

Desde que el ser humano conoció la existencia del automóvil, los fabricantes se han visto en la necesidad de crear, mejorar y actualizar la seguridad de los mismos, considerando como una de las mayores prioridades de seguridad, al factor de los sistemas de frenos, en la vida de los automóviles.

De esta manera se crearon los primeros sistemas de frenos, que no eran tan eficientes como se había esperado, debido a que producían un elevado desgaste de los materiales, en los cuales se les había creado, considerando que se debía mejorar dicho sistema de frenos, la evolución de la misma fue eminente, de manera que sus componentes como zapatas, pastillas, disco etc. De igual manera el sistema de accionamiento (hidráulico, mecánico, neumático, entre otros.), convirtiéndolos de esta manera en uno de los sistemas más rápidos y muy efectivos, por ende, más seguros y mucho más confiables.

Esta es la clasificación de los sistemas de frenos existentes:



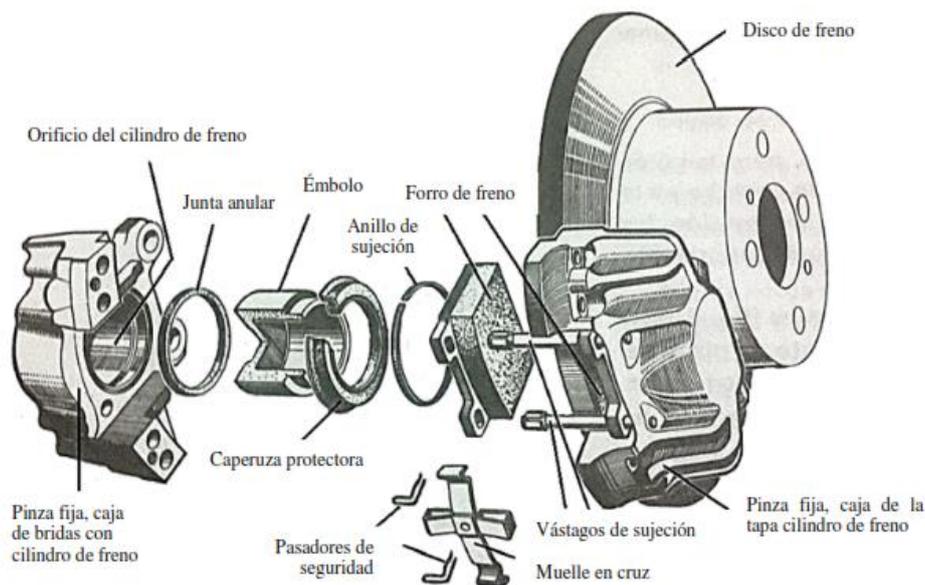
**Figura 1-1:** Clasificación de los sistemas de freno.

Fuente: Velastegui, 2015

## 1.2. Definición de frenos

Es aquel conjunto que está compuesto de elementos los cuales intervienen en el frenado y lleva como función disminuir o anular de manera progresiva la velocidad del vehículo, estabilizar esta velocidad es decir que el vehículo se mantenga de manera inmóvil.

El sistema de frenado funciona por la aplicación de un esfuerzo ejercido a expensas de una fuente de energía. El sistema de frenado se lleva a cabo gracias a que se compone de un elemento de accionamiento, de una transmisión y del freno.



**Figura 1-1:** Despiece de freno de disco de soporte fijo y dos cilindros

Fuente: Gerschler, 1985

## 1.3. Tipos de sistemas de frenos

### 1.3.1. Sistema de freno mecánico

Cuando hablamos de los frenos mecánicos, se los llega a utilizar principalmente para la activación de los frenos de tambor, cabe recalcar que dichos frenos se los encuentra en vehículos de alta carga y también en los vehículos livianos de tracción trasera.

Cuando se habla de los mencionados sistema de freno mecánico, teniendo en cuenta y considerando que la fuerza aplicada al pedal ya que estas se transmite a las zapatas de frenos de las diversas ruedas, por medio de varillas o cables, así la leva se acciona, consiguiendo de esta manera poder abrir las zapatas y que entraran en contacto con la superficie interna del tambor,

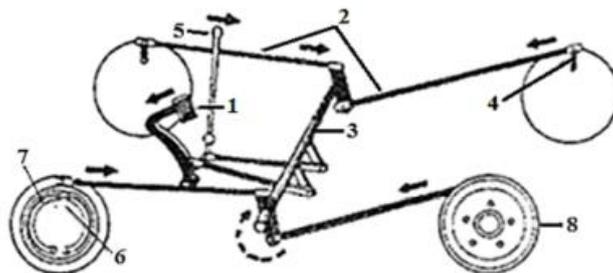
mediante estas, se debe considerar y tomar muy en cuenta que los tambores de las ruedas se traban, la cual llega a provocar una disminución del vehículo.

Actualmente los sistemas de freno mecánico son utilizados como freno de estacionamiento, de emergencia o también los conocidos y famosos frenos de mano.

Antiguamente, el sistema de frenos mecánicos era el que más se utilizaba, tomando en cuenta que los vehículos actuales llegaron a desarrollar velocidades impresionantes y, por ende, uno de sus principales retos fue la dificultad de mantener una presión pareja de frenado en las ruedas, fue muy necesario el estudio, análisis y el reemplazo por frenos hidráulicos, frenos neumáticos, etc.

fundamentalmente están constituidos de los siguientes elementos:

1. Pedal de freno.
2. Varillas.
3. Eje transversal.
4. Palanca de levas.
5. Palanca de freno de mano.
6. Leva de accionamiento de las zapatas.
7. Zapata.
8. Tambor.



**Figura 3-1:** Distribución de un freno del tipo mecánico

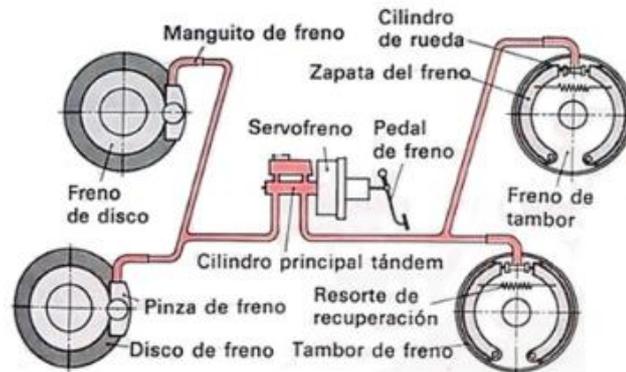
Fuente: Hernández Valencia, 2007

### 1.3.2. Sistema de freno hidráulico

Cuando se habla del sistema de freno hidráulico, es aquel que funciona a partir del principio de Pascal el cual dice “la presión en un punto en un fluido es igual en todas las direcciones en el espacio, lo que nos dice es que una presión aplicada en un fluido viaja de forma uniforme en todas las direcciones, con lo que la misma fuerza es llevada a todas las ruedas por el desplazamiento de

las zapatas y pastillas de freno, para apoyarse contra los tambores y disco de freno, respectivamente”.

Los elementos que constituyen el sistema de freno hidráulicos son:

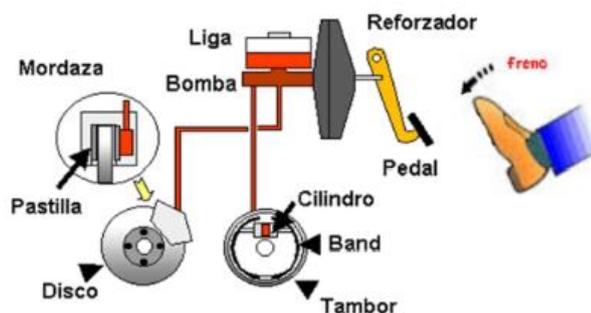


**Figura 4-1:** Esquema de un sistema de freno hidráulico

Fuente: Gerschler, 1985

Al momento que se llega a accionar el pedal de freno y actúa la bomba de freno la misma que llega a enviar líquido a presión por todas y cada una de las cañerías, en este proceso el líquido de freno transmite la fuerza del dispositivo de actuación al freno de rueda.

Considerando que el sistema de frenos de servicio se llega a dividir en dos circuitos independientes, de esta manera tomando en cuenta que cuando falla uno de los circuitos de freno, se mantiene la efectividad y seguridad del segundo.



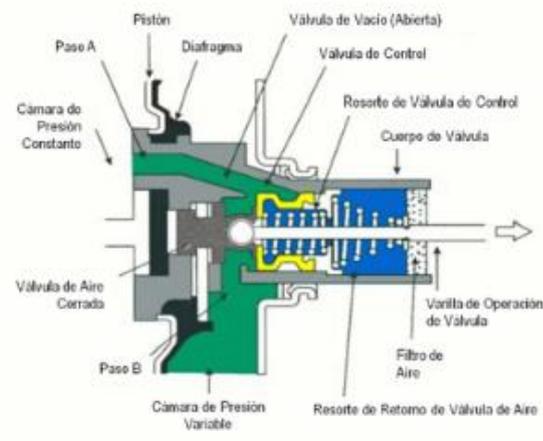
**Figura 5-1:** Esquema de freno hidráulico

Fuente: Formando, 2015.

Cuando se llega a soltar el pedal esta baja la presión del líquido; haciéndola regresar a su posición inicial es decir al sistema y regresando el líquido del cilindro hacia la bomba.

### 1.3.2.1. Servofreno

Con el único objetivo, de reforzar y mejorar la fuerza de frenado, los automóviles incorporan al sistema de freno hidráulico un dispositivo de ayuda accionado por vacío el mismo que se le conoce con el nombre de servofrenos, se debe tener en cuenta que se utiliza la diferencia de presión atmosférica y de vacío del colector del motor y aumentando la fuerza del pedal de 2 a 4 veces, este se encuentra ubicado entre el pedal del freno y el cilindro principal, véase en la siguiente Figura 6-1. (Velasteguí Andrés, 2015, p. 15 - 22)



**Figura 6-1:** Servofreno

Fuente: E-Auto, 2014

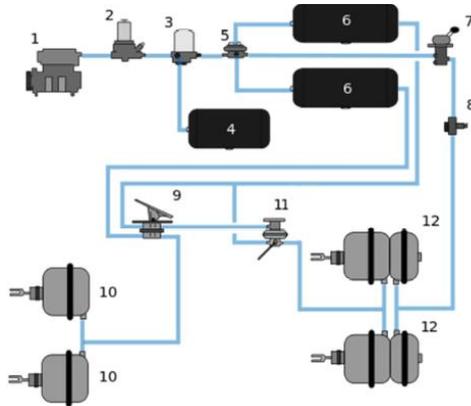
Se debe considerar que la fuerza del pie no es lo suficiente para lograr detener el coche, hacen falta otros componentes que amplifiquen esta fuerza y se pueda hacer efectiva. Es exactamente esto lo que logra el servofreno, una pieza que llega a permitir que el conductor pueda hacer menos esfuerzo con el pie al momento de frenar.

El servofreno, también conocido como booster, es aquel componente del sistema de frenado que determina el grado de fuerza que se debe aplicar para realizar la frenada. De igual manera se fue implementando en todos los autos obviamente a medida que estos fueron ganando potencia y peso, hasta convertirse en una de las partes primordiales para lograr el frenado. (DIRA, 2019, p.1)

### 1.3.3. Sistema de freno neumático

Ciertamente su funcionamiento básico es: al accionar el pedal, el aire es empujado por el compresor (1) llegando al depósito de aire (6) que está protegido de sobre presurización por (5) que es la válvula de protección de cuatro vías. Hay que resaltar que el regulador de presión

controla la presión en el reservorio gobernando el compresor. El aire está disponible desde los depósitos de aire hasta la válvula de freno de servicio (9).



**Figura 7-1:** Sistema de aire comprimido

Fuente: Wikipedia, 2008

- 1.- Compresor
- 2.- Regulador de presión
- 3.- Secador de aire
- 4.- Depósito de regeneración
- 5.- Válvula de protección de cuatro vías
- 6.- Depósitos de aire comprimido
- 7.- Válvula de freno de mano.
- 8.- Válvula de descarga del freno de mano
- 9.- Válvula de freno de servicio
- 10.- Cámaras de aire de frenos delanteros
- 11.- Válvula de control del reparto de frenada
- 12.- Cámaras de aire de frenos traseros

De modo que el conductor al accionar el pedal, la válvula de freno de servicio (9) llega a permitir el paso de aire a las cañerías de los frenos delanteros (10) y en las cámaras de freno, de los frenos posteriores (12). Además, en la cámara de freno la varilla de empuje produce un movimiento en los tensores, los cuales rotan las cámaras, forzando a las zapatas de freno hacer contacto con el tambor, por consiguiente, se llega a detener el vehículo como los frenos mecánicos. (Velasteguí Andrés, 2015, p.25)

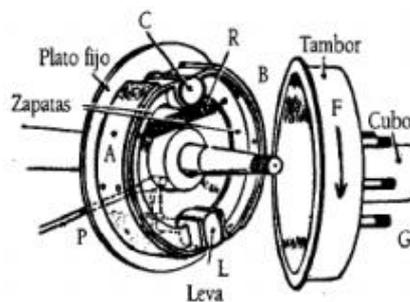
#### 1.4. Tipos de frenos

Considerando la existencia de varios y distintos sistemas de frenado, hay diferentes tipos de

frenos, por lo tanto, los más utilizados actualmente, son los frenos de tambor y los frenos de disco. De manera que en los últimos tiempos se ha visto una gran tendencia a implementar los frenos de disco debido a su comprobable y gran eficacia.

#### 1.4.1. *Freno de tambor*

No obstante, el freno de tambor se inventó alrededor del año 1900, es un freno en el cual se utiliza la fricción para poder realizar su función. Las mismas que están formadas por un tambor giratorio situado en las ruedas del vehículo, y en una parte fija, constituida por unas zapatas interiores A y B (Figura 8-1), forradas de amianto o de compuestos a base de fibra de vidrio, articuladas mediante un eje fijo C, sobre un plato soporte solidario al chasis, en la parte inferior de las zapatas, la leva L, o un bombín hidráulico, y esta se llega a abrir cuando se tira de la varilla P, en el caso del sistema mecánico, y aprieta las zapatas contra las paredes interiores del tambor F. Cuando se encuentran en reposo, es decir cuando no se frena, las zapatas oprimen la leva, o el bombín, por acción del resorte R, quedando separadas del tambor con la holgura necesaria.



**Figura 8-1:** Freno de tambor

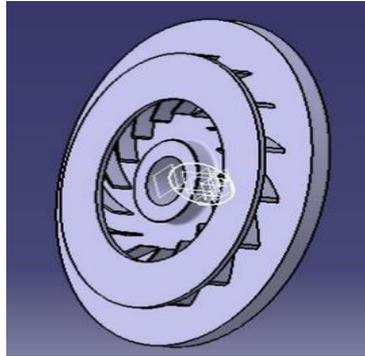
Fuente: Arias Paz – Manual de automóviles, 2004

#### 1.4.2. *Freno magnético*

Incluso los frenos magnéticos que se usan en los dinamómetros de laboratorio para las distintas y diferentes pruebas que se hacen con motores de automóviles con el objetivo de conocer su potencia y emisión de gases contaminantes y dañinas para el medio ambiente, la misma que producen una gran cantidad de calor debido a la conversión de energía mecánica en energía térmica durante las diferentes pruebas realizadas. Para poder evitar daños permanentes en las partes del freno la energía térmica la cual debe ser removida por medio de ventiladores integrados a los rotores del mismo freno.

Al igual que la forma básica del freno consiste en un disco rotativo por donde se puede hacer

pasar un flujo magnético que produce el par de frenado, con álabes y ductos para mover el aire, y un estator donde se montan las bobinas que ocasionan el flujo magnético, Figura 9-1.

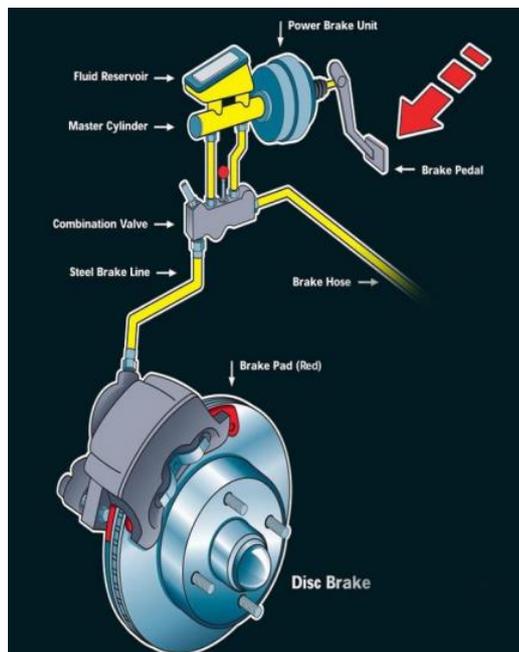


**Figura 9-1:** Disco de freno magnético

**Fuente:** Hernández Juan, 2015

### 1.4.3. Freno de disco

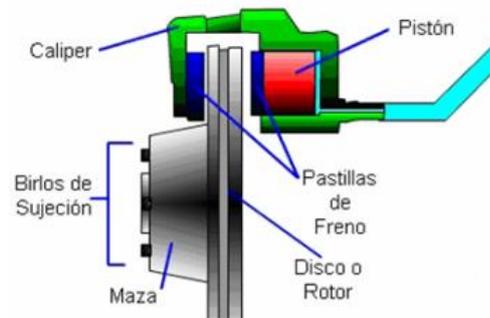
En la siguiente figura 10-1 se observa los elementos desde el accionamiento del pedal del freno en el vehículo hasta la acción del frenado que se genera en el freno de disco. El líquido de frenos circula por el circuito hidráulico hasta presionar el pistón y empujar la pastilla contra el disco. Además, la presión contra el disco de la pastilla que se desplaza con el pistón, empuja la otra pastilla contra el disco. El rozamiento entre las pastillas y el disco frena la rueda.



**Figura 10-1:** Elementos del sistema de freno de disco

**Fuente:** Manual técnico High Power Brake

En la figura 11-1 se logra observar todos y cada uno de los componentes de un freno de disco para y así poder tener una idea más clara de su accionamiento y partes del mismo.



**Figura 11-1:** Componentes del freno de disco

**Fuente:** Manual técnico High Power Brake

#### 1.4.3.1. Discos

Por lo tanto, existen varios tipos de discos de freno. Algunos de ellos son de fundición de modo que otros son de acero u otros materiales más innovadores y actualizados como materiales cerámicos. Por otra parte, considerando que algunos están ranurados en la superficie (superficies rugosas ya que ayudan a mejorar el momento del frenado) o llegan a tener dichos agujeros que los atraviesan. Estos últimos, también llamados discos ventilados, ya que ayudan a disipar el calor.

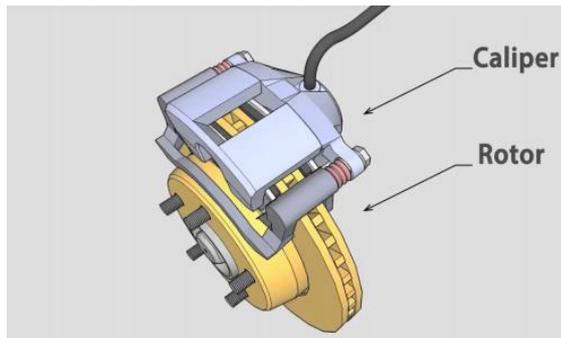


**Figura 12-1:** Tipos de discos

**Fuente:** Manual técnico High Power Brake

#### 1.4.3.2. Mordazas (calipers) o pinzas

En cambio, se debe recordar que la mordaza es el soporte de las pastillas y los pistones de freno. Sabiendo que los pistones están generalmente hechos de hierro y posterior a eso son recubiertos por un cromado.

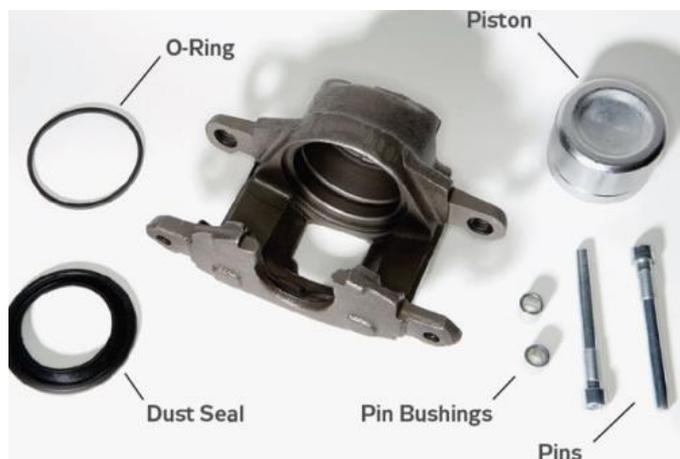


**Figura 13-1:** Caliper

Fuente: Manual técnico High Power Brake

#### 1.4.3.3. Pistones o cilindros

Al hablar de los pistones estos cuentan con una fijación que llevan al alrededor y sellos que no permite el escape de la presión que es ejercida por el líquido de frenos, a través del cual son accionados. Considerando que la mordaza lleva un conducto por el cual entra el líquido de frenos y haciendo que la mordaza empuje la pastilla contra el disco y a la misma vez, que se corra la mordaza para lograr frenar con ambas y se logre homologar el frenado y el desgaste. (High Power Brake, 2018, p.9 - 11)



**Figura 14-1:** Pistón

Fuente: Manual técnico High Power Brake

### 1.5. Materiales del freno de disco

Por eso los frenos deben cumplir con una serie de parámetros debido a que están expuestos a exigencias muy altas, especialmente en la parte que tiene que ver con el desgaste y temperaturas, tanto que el material debe contar con propiedades que satisfagan los requerimientos ya establecidos. De manera general se ha desarrollado el hierro fundido gris, como el material más

adecuado para la construcción y elaboración de estos elementos.

Cuando se habla del hierro fundido se sabe que 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%, tomando en cuenta que estos son los elementos predominantes. Además, existen varios tipos de fundiciones, entre las cuales destacan las siguientes: el hierro gris, blanco, maleable, de grafito compactado y el nodular. También se los puede clasificar en función de su estructura: ferríticos, perlíticos, enfriados y templados o bainitizados.

Entonces se dice que la fundición gris es una aleación donde su fractura es de color gris, que contiene carbono y silicio en cantidades muy considerables. Se dice que casi en su totalidad el carbono se encuentra en forma de grafito laminar, esto produce en la fundición una buena maquinabilidad, estabilidad dimensional y por ende esto permite construir piezas complejas. Los discos de freno, bloques de motor son creaciones de este material. (Loayza William, 2017, p.12)

Una de la inspiración para el disco de freno cerámico de carbono (carburo de silicio y fibras de carbono) se derivó de la incansable búsqueda para la perfección del rendimiento en los coches de carrera y del alto rendimiento, en sistemas de frenos de vehículos ferroviarios de muy alta velocidad y en aviones supersónicos para la época. Los discos de freno cerámicos de carbono de alto rendimiento están sujetos a fuerzas extremas, como son el calor y la fricción. Esto de manera inevitablemente conduce a la reducción de la resistencia mecánica de los discos de freno. Considerando que los discos son extremadamente durables, pero bajo condiciones normales, tomando en cuenta que una conducción ambiciosa puede acortar su vida útil de modo drástico. Para poder garantizar la seguridad de los pasajeros, se debe considerar que todos los componentes de los frenos deben ser monitoreados periódicamente. (CARBOTEQ, 2017, p.2)

## **1.6. Pastillas de freno**

Al momento que se habla de las pastillas de frenos se dice que son uno de los componentes de mayor importancia en el vehículo por la seguridad y confianza que estos llegan a brindar, son una parte fundamental del sistema de frenos del automóvil debido a que proporcionan la fricción necesaria a los discos de freno y de tal forma que cuando accionamos el pedal, los vehículos disminuyen su velocidad y se detiene de manera inmediata. Se puede considerar que la utilización más común es en motos, automóviles y camiones. (Grefa Lenin y Casanova Patricio, 2015, p.28)



**Figura 15-1:** Pastillas de freno

Fuente: MOTORCRAFT, 2018

### 1.6.1. *Características generales de las pastillas de frenos*

Por consiguiente, los materiales de las pastillas de frenos tienen requerimientos básicos que son:

- Se debe presentar un coeficiente de fricción muy adecuado y estable a cualquier rango de temperatura y presión que se pueda presentar.
- Se debe mantener un buen equilibrio entre abrasión y resistencia al desgaste.
- Una cierta perceptibilidad, tanto en frío y como en caliente, que esto hace que el material absorba vibraciones e irregularidades de la otra superficie con al que debe entra en contacto.
- Debe contar con una buena resistencia al choque y al desgaste, del mismo.

Para poder conseguir y llegar a satisfacer todos aquellos requerimientos por lo tanto cada uno de los fabricantes debe implementar sus propias formulaciones, en las cuales se debe ensayar una y otra vez hasta llegar a conseguir los resultados que le aportan la calidad que se esperaba.

#### 1.6.1.1. *Composición de las pastillas de freno*

Por consiguiente, en la actualidad existen diferentes variedades de tipos de materiales para la fabricación de pastillas de frenos. Por lo tanto, la base principal puede estar compuesta de materiales orgánicos, metálicos, carbónicos y cerámicos, cada uno de los fabricantes de materiales emplean en mayor o menor medida a la base de modo que se fundamente en lo siguiente:

**Fibras:** son todos aquellos elementos encargados de agrupar y unir el resto de los elementos. Tomando en cuenta la existencia de dos tipos principales de fibras las sintéticas y las minerales. Las más usuales son: fibras de vidrio, fibras de aramida, lana de roca, etc.

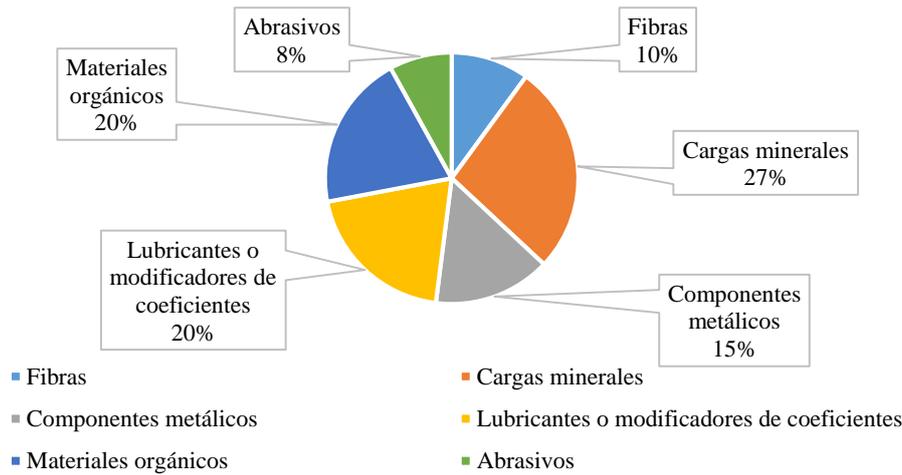
**Cargas minerales:** son todas aquellas que se encargan de dar esa consistencia mecánica a los elementos, es decir, aportan la resistencia al desgaste, quebraduras y a las altas temperaturas. Entre ellas tenemos las más usuales que son: barita, magnesita, talco, mica, carbonato, feldespato y otros. Todos y cada uno de estos elementos mencionados anteriormente son materiales cerámicos ya que tienden a ofrecer mejores prestaciones y, por tanto, mayor seguridad. Considerando que no solo porque sean capaces de detener el vehículo en muy poca distancia (metros), sino por otras muchas razones. Uno de los varios ejemplos, es que cuenta con una óptima resistencia al fading, que es aquella aparición de burbujas de vapor en el circuito de frenos, de hecho, estas duran hasta cuatro veces más que los frenos tradicionales.

**Componentes metálicos:** estos componentes metálicos se añaden en forma de polvo o viruta para conseguir homogeneizar el coeficiente de fricción, así como también la transferencia de calor de la pastilla al caliper. Entre ellos contamos con los más usuales tales como: latón, cobre, bronce entre otros.

**Lubricantes o modificadores de coeficiente:** estos elementos son aquellos que están encargados de hacer que tengan una variedad del coeficiente de fricción normalmente baja, esto es dependiendo del rango de temperatura de funcionamiento. Son empleados en forma de polvo tales como grafitos, coque, sulfuros, antracitas, etc.

**Materiales orgánicos:** los materiales orgánicos son todos aquellos que están encargados de aglomerar o reunir el resto de los materiales. Cuando se alcanza una determinada temperatura estos fluyen y se unen con el resto de componentes, hasta que se polimerizan. Las más importantes y conocidas tenemos a: las resinas fenólicas termoendurecibles, aunque también son empleados diferentes tipos de cauchos, ceras, aceites. El término termoendurecible es aquel que se refiere a los polímeros que, en condiciones de temperaturas adecuadas y/o en presencia de sustancias particulares, se transforman en materiales rígidos, insolubles e infusibles muy dañinas.

**Abrasivos:** son aquellas que llegan a aumentar el coeficiente de fricción entre la pastilla y el disco de freno. Considerando que también se debe al rozamiento entre la pastilla y el disco, estos elementos son aquellos que renuevan y limpian la superficie de contacto del disco, llegando a formarse una especie de nueva capa, la cual es conocida también como tercera capa.



**Gráfico 1-1:** Composición de los materiales de fricción

**Fuente:** Velasteguí, 2015

**Realizado por:** Aguirre César, 2021

#### 1.6.1.2. Componentes de las pastillas de freno

**Soporte metálico:** dentro de las varias funciones de este elemento es la de mantener el material de fricción en el porta-pastillas del caliper. Una de las características principales de éste, es que su superficie sea plana para evitar cuando se está dando el proceso de prensado en caliente y posterior curado de las pastillas surjan fisuras entre el soporte y el material de fricción.

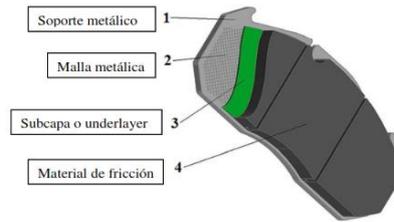
De modo que los soportes se fabrican por estampación a partir de una lámina del espesor requerido. La impregnación de un soporte metálico con una resina de gran adherencia es una fase muy crítica del proceso de fabricación, ya que se debe garantizar y constatar una correcta adherencia del material de fricción al soporte.



**Figura 16-1:** Soporte metálico

**Fuente:** Euro4x4Parts, 2015

**Subcapa o underlayer:** sintetizando que es una capa de material y cuya función es la de fijar el material de fricción en el soporte y además de reducir la temperatura que llega al caliper.



**Figura 17-1:** Diseño convencional

Fuente: Mytopbrakes, 2015

**Lámina antiruido:** es decir aquellos accesorios cuya gran función principal es la de absorber las vibraciones que se producen al tener un contacto entre la pastilla y el disco, evitando así la aparición de ruido.



**Figura 18-1:** Lámina anti ruido

Fuente: WOLVERINE KOREA CO LTD, 2015

Existen muchas variedades de materiales como son: láminas de fibra de vidrio, láminas metálicas y se debe tomar en consideración que estas dependen mucho del tipo de vehículo en el cual va montada la pastilla.

**Material de fricción:** es aquel el elemento que, al momento de ser accionado el pedal del freno, se junta contra el disco de freno la misma que termina provocando una fricción entre los dos materiales, y por ende permite la desaceleración del vehículo, se debe tener claro que los materiales de fricción pueden ser de diferentes tipos y fabricados mediante esto debido a diferentes procesos. Pero en el área automotriz y de clasificación a estos se los clasifica en materiales flexibles y rígidos.

### 1.6.1.3. Fabricación

Obviamente se tiene en cuenta que la fabricación varía según el fabricante y la composición que

deseo obtener, aunque tomando en consideración que ya es un proceso estandarizado a grandes rasgos a continuación se puede observar cuales son los pasos fundamentales a seguir para fabricar:

**El proceso de mezclado:** a saber, que es uno de los principales pasos, asumiendo que su misión es la de mezclar todos los componentes de forma homogénea. En este proceso es de vital importancia el tiempo que deben durar los componentes en el mezclador, considerando que cada fibra tiene un tiempo óptimo en el cual su longitud es la mayor posible y con esto se llega a la obtención de una mezcla homogénea.

**Prensado en caliente:** en cambio la misión del prensado es la de aglutinar los varios componentes, es decir que con la presión se llega a reducir el volumen y con la temperatura funde las resinas con la finalidad de que fluyan por toda la mezcla y así se vayan ligando los diferentes elementos. Ya en esta etapa se colocan los soportes al material de fricción, que llevan impregnados una resina que consigue la adhesión del material. Por lo tanto, el tiempo típico de prensado varía de 10 a 12 minutos según la fórmula empleada que se haya realizado para permitir el correcto curado en las prensas de las resinas.

**Curado:** cabe destacar que se lo realiza en hornos, donde se debe completar la polimerización de las resinas, para poder conseguir una perfecta e intacta compactación e ir perdiendo contenido existente de volátiles. Este proceso se lo lleva a cabo en varias etapas donde la pastilla de freno es sometida a diferentes temperaturas.

**Quemado:** es necesario resaltar y aclarar que esta es la última fase, que el material de fricción es sujeto a temperaturas altas como a 500°C o pueden ser muy superiores a dicha temperatura. Por medio de una llama o una placa caliente se alcanza y se logra eliminar gran parte de materiales orgánicos aún existentes, la resina es la misma que toma una textura como de grafito y por ende la pastilla de freno adquiere sus características de manera definitivas. Es de suma importancia conocer que esto es un proceso que pocos fabricantes lo incorporan debido al alto costo que esto implica no obstante que el proceso es delicado.

**Mecanización:** conviene señalar que en este proceso las pastillas son adaptadas a las características dimensionales requeridas según su aplicación. Donde se las rectifican para poder conseguir el espesor de material de fricción necesario o la realización de los chaflanes o ranuras.

**Puesta de accesorios:** conviene señalar que durante esta etapa se les añaden a las pastillas todos y cada uno de los elementos complementarios tales como los muelles, resortes, avisadores.

**Marcado y estuchado:** en otras palabras, las pastillas están finalizadas, ya solo queda marcarlas y estucharlas para poderlas comercializar y satisfacer a los diferentes clientes del mercado. (Velasteguí Andrés, 2015, p.30-37)

## 1.6.2. *Tipos de pastillas de freno*

### 1.6.2.1. *Cerámicas*

Por otra parte, este tipo de pastillas están compuestas por cerámica y fibra de cobre, lo que les permite que las pastillas de este tipo logren controlar la tendencia del freno a perder potencia en aquellas temperaturas altas y se recuperen de manera más rápida una vez que se pueda detener el vehículo o móvil del disco.

#### *Ventajas:*

- Silencioso: en otras palabras, las pastillas de freno de cerámica están realizadas de una mezcla de materiales principalmente cerámicos con pequeñas cantidades de sustancias no metálicas. En este tipo de pastillas de freno son consideradas más suaves, por ende, esto quiere decir que ayuda a reducir el ruido significativamente al frenar.
- Baja cantidad de polvo de freno: cabe señalar que los materiales utilizados para realizar las almohadillas de cerámica estas solo crean una cantidad muy ligera de polvo de freno. Es importante destacar que, a diferencia de otros tipos de pastillas de freno, que generan grandes cantidades de polvo de freno, cabe destacar que el polvo de las pastillas de cerámica es mucho más fácil de limpiar de las llantas de un automóvil.
- Durabilidad: conviene enfatizar que las pastillas de freno de cerámica son mucho más duraderas y recomendable que las pastillas de freno metálicas, semi-metálicas, u orgánicas.

#### *Limitaciones:*

- No aptos para camiones grandes: es necesario resaltar que las pastillas de freno de cerámica son de construcción suave y no necesariamente llegan a funcionar bien con camionetas pickup y de servicio pesado que logran transportar más peso que los vehículos de pasajeros.

- Costoso: definitivamente si bien es cierto que hay opciones mucho más accesibles y disponibles en el mercado, la mayoría de las pastillas de freno de cerámica tienen un precio mucho más alto que las otras pastillas de freno semimetálicas o alternativas orgánicas.

#### 1.6.2.2. *Orgánicas*

Es decir que están compuestas por materiales muy comunes y algunos con el grafito, resinas y fibras, sin duda alguna estas son de una inmejorable calidad y adherencia al frenar, por ende, generan menos calor que las metálicas y considerando que en este tipo de pastillas es necesario y de vital importancia realizar un rodaje en los primeros kilómetros.

#### 1.6.2.3. *Semi metálicas, bajo metal o metálicas*

Conviene señalar que estas están compuestas por materiales de fricción como el hierro, la fricción en condiciones de seco y mojado, la misma que no varían demasiado, consiguiendo de esta manera una mejor frenada en condiciones de mojado que los otros tipos de pastilla. Ciertamente cabe resaltar que la duración es muy elevada, llegando a alcanzar los 15 000 kilómetros. El calor que se logra desprender es mucho mayor que los otros tipos. (High Power Brake, 2018, p.13 -15)

#### *Ventajas:*

- Ideal para la transferencia de calor: considerando que las pastillas de freno semimetálicas generalmente están fabricadas de lana de acero, cobre y otras sustancias metálicas, que se pueden llegar a manejar en las altas temperaturas de la transferencia de calor y es mejor que los frenos de cerámica.
- Perfecto para camiones pesados: se consideran a las camionetas grandes que transportan más peso, y por lo consiguiente tiende a generar mucho más calor y presión dentro del sistema de frenos. Por concepto que las pastillas de freno semimetálicas, bajo metal o metálicas están construidas y aptas para manejar la transferencia de calor, son perfectamente adecuadas y condicionadas para vehículos pesados.
- Asequible: mientras que este tipo de pastillas de freno son comúnmente utilizadas y recomendadas por la mayoría de los fabricantes, tomando en cuenta que son menos costosas que las pastillas de cerámica u orgánicas.

*Limitaciones:*

- Generación mínima de ruido: cada vez que se llega a reducir la velocidad o se detiene de manera completa, este tipo de pastillas de freno suelen ser un poco más ruidosas que los de modelos de cerámica ya mencionadas.
- Crear polvo de freno: las pastillas de freno semimetálicas, bajo metal o metálicas producen un polvo de freno debido principalmente a sus materiales disipadores de calor.
- Menor duración: considerando a los modelos semimetálicos, bajo metal o metálicas estas usan materiales que no duran tanto tales como los que se usan en las pastillas de freno de cerámica.

**1.6.3. Evaluación de daños en pastillas de freno de disco**

*1.6.3.1. Desprendimiento del material de la pastilla por corrosión*

*Causas:*

- En este punto se hablará del desprendimiento de los bordes por el uso de nuevas pastillas de freno sobre discos de freno rodados de manera excesiva.
- Fuerza elástica insuficiente del muelle de retención (carga sobre el borde lateral)
- Otro tipo de sobrecarga mecánica.
- Una gran elevada carga térmica permanente de las pastillas de freno de los discos.



**Figura 19-1:** Desprendimiento de los bordes

Fuente: Textar, 2019

*1.6.3.2. Desprendimiento de material por alto grado de oxidación*

- Cabe recalcar que el material de la pastilla se vuelve poroso (completa o parcialmente)
- El material de la pastilla se llega a descomponer a causa del óxido

- La placa de soporte de la pastilla presenta claros y marcados signos de oxidación
- Restos de adhesivo
- Capa intermedia y material de la pastilla muy visible en la placa de soporte de la pastilla



**Figura 20-1:** Alto grado de oxidación

**Fuente:** Textar, 2019

#### *1.6.3.3. Desprendimiento del material de la pastilla por destrucción térmica*

No obstante, a que el material se descompone, se rompe muy parcialmente y/o se destruye la capa intermedia y por ende el adhesivo. Por lo tanto, la pastilla se desprende continuamente, y la pintura se descascara. Dando una decoloración parcial de la placa de soporte de la pastilla. El material de la pastilla está endurecido, y hace un sonido duro, que presenta una decoloración marrón rojiza, parcialmente con ceniza blanca.



**Figura 21-1:** Pastilla dañada por destrucción térmica

**Fuente:** Textar, 2019

De ello resulta necesario decir que esto ocurre porque las pastillas de freno de disco se han sobrepasado durante o más de 15-20 minutos, por lo tanto, la temperatura máxima permitida (depende del fabricante entre 500 y 800 °C). En este caso, los componentes que contribuyen de un modo muy significativo a la dureza serán dañados.

#### *1.6.3.4. Desprendimiento del material de la pastilla por influencias mecánicas*

Por consiguiente, el material de la pastilla se desprende de la placa de soporte de la pastilla. La misma que llegan a producir separaciones en las capas.

En pocas palabras se dice que esto ocurre porque las pastillas de freno de disco se les han dejado caídas, se instalaron inclinadas o se han llegado a deformar a causa de “sacudidas” muy extremas en la pinza de freno.



**Figura 22-1:** Pastilla dañada por influencias mecánicas

Fuente: Textar, 2019

#### *1.6.3.5. Desprendimiento del material de la pastilla por producción defectuosa*

Tomando en consideración que el material de la pastilla ya se ha disuelto con una carga reducida y que no se dispone de una cantidad suficiente de adhesivo.



**Figura 23-1:** Pastilla dañada por producción defectuosa

Fuente: Textar, 2019

Se debe recordar que este daño ocurre porque la placa y el soporte de la pastilla está lisa o la capa intermedia además el adhesivo solo son visibles parcialmente considerando que la capa de adhesivo intermedia está distribuida de forma deficiente.

#### *1.6.3.6. Daños provocados por el uso generando grietas superficiales*

De igual manera las grietas superficiales carecen de importancia, considerando que no representan riesgos de seguridad. De forma similar con pastillas de frenos acanaladas no hay ninguna desventaja en términos de resistencia de la pastilla.

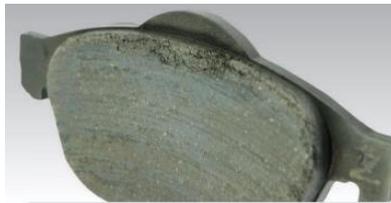


**Figura 24-1:** Grietas superficiales en pastillas de freno

Fuente: Textar, 2019

#### *1.6.3.7. Daños provocados por el uso generando roturas de los bordes*

Se debe tener en claro que las roturas en los bordes carecen de importancia y no representan riesgos de seguridad.



**Figura 25-1:** Rotura en los bordes de pastillas de freno

Fuente: Textar, 2019

Puesto que estas roturas en los bordes, son consecuencias relacionadas con el diseño y dependiendo de la carga térmica o mecánica, pueden estar marcadas de una forma completamente diferente. Debido a que la rotura de bordes está permitida en un máximo del 10% de la superficie de la fricción total.

#### *1.6.3.8. Daños provocados por el uso patrón de contacto defectuoso*

Ya que este daño ocurre porque el disco de freno se encuentra desgastado o falso, defecto/impureza en el frenado, además de eso una tensión de frenado insuficiente.



**Figura 26-1:** Pastilla con patrón de contacto insuficiente

Fuente: Textar, 2019

### 1.6.3.9. Daños en pastillas de freno de disco por error de montaje

De mismo modo que este daño se genera debido al momento del montaje no se lo respeta, la posición de instalación, debido a manipulaciones antes o durante la instalación, provocando un posicionamiento incorrecto de la pastilla en la mordaza, etc. (Textar, 2015, p.8 -25)



**Figura 27-1:** Marca visible en la placa de soporte de la pastilla

Fuente: Textar, 2019

### 1.6.3.10. Daños por influencias medioambientales

#### Causas

- Un patrón de contacto insuficiente y un frenado de limpieza defectuoso tras una sobrecarga de temperatura.
- Por lo tanto, con frecuencia no se alcanza la temperatura de funcionamiento, obviamente no se lleva a cabo la auto limpieza. Y la suciedad de la superficie de fricción, por ejemplo: óxido, impurezas, pintura o sal.
- Considerando el uso de un disco de freno rugoso y el acceso al disco por parte de cuerpos extraños ejemplo: suciedad, sal o corrosión.
- Es importante destacar la transferencia de material del disco de freno a la pastilla de freno a causa de una diferencia de desgaste, condiciones climáticas tomando en consideración la incompatibilidad del material.



**Figura 28-1:** Formación de impurezas en la superficie del revestimiento

Fuente: Textar, 2019

## 1.7. Materiales compuestos

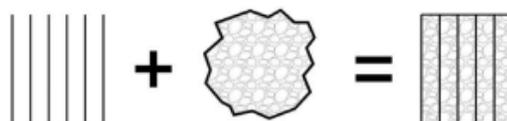
Al hablar de los materiales compuestos se dice que son todos aquellos que están formados por combinaciones de metales, cerámicos y polímeros. Es necesario resaltar que las propiedades que se pueden obtener de estas combinaciones son superiores a la de los materiales que los forman por separado, por lo tanto, provoca que su utilización sea cada vez más imponente y sobre todo en aquellas piezas en las que se necesitan propiedades combinadas, cuando un material (polímero, metal o cerámico) por sí solo no nos puede llegar a brindar.

En resumen, una de las desventajas más claras de los materiales compuestos es el precio. Obviamente que las características de los materiales y de los procesos encarecen mucho a el producto final. En pocas palabras se concluye que para ciertas aplicaciones las elevadas propiedades mecánicas tales como: la alta rigidez específica, la buena estabilidad dimensional, la tolerancia a altas temperaturas, la resistencia a la corrosión, la ligereza o una mayor resistencia a la fatiga que los materiales clásicos compensan el alto precio

Conviene destacar que además del refuerzo y la matriz existen otros tipos de componentes como cargas y aditivos que dotan a los materiales compuestos de muchas características peculiares para cada uno del tipo de fabricación y aplicación de la misma.

### 1.7.1. Elementos de un material compuesto

En la figura 29-2 se muestran cuáles son los elementos que componen un material, compuesto de manera enfática es importante considerar todas y cada una de las fases constituyentes, esto significa que dicha combinación de propiedades y características debe ser la correcta, con el objetivo de que el material resultante a obtener muestre claramente propiedades mejoradas.



**Figura 29-1:** Elementos que componen un material compuesto

Fuente: Mazumdar, 2003

A modo de cierre, los componentes que llegan a formar parte de la estructura de un material compuesto se llaman: matriz y refuerzo, recordando que la superficie que une los compuestos se llama interfaz.

### 1.7.1.1. Matriz

Conviene señalar que el material en el cual el elemento, usado como refuerzo queda totalmente insertado y pueden ser de tres tipos: cerámicos, metálicos o resinas orgánicas. A excepción de la matriz cerámica y el material que se selecciona, no es tan rígido t mucho menos tan resistente como lo es, el material de refuerzo.

Se puede apreciar claramente a las funciones de la matriz y son: definir las propiedades físicas y químicas, transmitir las cargas al refuerzo, protegerlo y brindarle cohesión.

#### Tipos de matrices

Se cuenta con 3 tipos de matrices tales como: matrices poliméricas, matriz metálica y matriz cerámica. El estudio se enfoca en el tipo de matriz polimérica y cerámica.

Matrices poliméricas: son aquellas que generalmente van hacer más utilizadas. La mayor parte de los polímeros, como son los de tipo termoplásticos y termoestables obviamente están disponibles en el mercado con el agregado de fibras de vidrio cortas como refuerzo.

Matriz cerámica: cada uno de los compuestos de la matriz cerámica saben presentan buenas propiedades a altas temperaturas y además son más livianos que los de una matriz metálica a claramente que están a similares temperaturas.

### 1.7.1.2. Refuerzos

Hay que resaltar cuales son los tipos de refuerzo que se los puede clasificar en tres categorías: fibras, whiskers y partículas. Desde el punto de vista las propiedades mecánicas, se puede llegar a obtener una gran mejora y esto mediante el uso de fibras continuas, logrando reforzar en la dirección del esfuerzo aplicado; mientras que con whiskers y partículas se experimenta una gran disminución de resistencia, pero se llega a obtener una gran isotropía en el material.

Los whiskers son aquellos mono cristales muy delgados y como en consecuencia de su pequeño diámetro, tienen un alto grado de perfección cristalina y están prácticamente libres de cualquier defecto. Estos pueden ser de grafito, carburo de silicio, nitruro de silicio o de óxido de aluminio.

Estos materiales son utilizados como refuerzos en materiales compuestos: fibra de vidrio, fibra de carbono, fibras orgánicas, fibras naturales, fibras animales.

### 1.7.1.3. Interfase matriz-refuerzo

Mientras que la zona de interfase es una región de composición química variable, donde tiene lugar, la unión entre la matriz y el refuerzo que asegura la transferencia de cada una de las cargas aplicadas entre ambos y condiciona las propiedades mecánicas finales de los materiales compuestos. (Bautista Christian y Mena Patricio, 2018, p.45-79)

### 1.7.2. Clasificación de los materiales compuestos

Usando un esquema muy simple y entendible para clasificar cada uno de los materiales compuestos estos constan de tres divisiones (Fig. 30-1) compuestos reforzados con partículas, compuestos reforzados con fibras y compuestos estructurales.

No obstante, cabe resaltar que este estudio se enfoca en los materiales compuestos por fibras.



**Figura 30-1:** Clasificación de los materiales compuestos

Fuente: Borque Alberto, Nogueira Marar, 2007

#### 1.7.2.1. Materiales compuestos reforzados con fibras

Por otro lado, tecnológicamente se dice que, los materiales compuestos con fases dispersas en forma de fibras son los de más importancia. Definitivamente a menudo se diseñan materiales compuestos, reforzados con fibras con la única finalidad de conseguir una elevada resistencia y rigidez a baja densidad. En la siguiente Tabla 1-1 se detallan cada una de las características de los materiales que están reforzados con fibras.

**Tabla 1-1:** Características de materiales reforzados con fibras

<i>Material.</i>	<i>Peso específico.</i>	<i>Resistencia a la tracción. (psi × 10<sup>3</sup>) (MPa × 10<sup>3</sup>)</i>	<i>Resistencia específica. (psi × 10<sup>6</sup>)</i>	<i>Módulo elástico. psi × 10<sup>6</sup> (MPa × 10<sup>3</sup>)</i>	<i>Módulo específico. (psi × 10<sup>6</sup>)</i>
<b>Whiskers.</b>					
Grafito	2,2	3 (20)	1,36	100 (690)	45,5
Carburo de silicio	3,2	3 (20)	0,94	70 (480)	22
Nitruro de silicio	3,2	2 (14)	0,63	55 (380)	17,2
Óxido de aluminio	3,9	2-4 (14-28)	0,5-1,0	60-80 (415-550)	15,4-20,5
<b>Fibra.</b>					
Aramida (Kevlar 49)	1,4	0,5 (3,5)	0,36	19 (124)	13,5
Vidrio E	2,5	0,5 (3,5)	0,20	10,5 (72)	4,2
Carbono <sup>a</sup>	1,8	0,25-0,80 (1,5-	0,18-0,57	22-73 (150-500)	15,7-52,1
Óxido de aluminio	3,2	5,5)	0,09	25 (170)	7,8
Carburo de silicio	3,0	0,3 (2,1) 0,50 (3,9)	0,17	62 (425)	20,7
<b>Alambres metálicas.</b>					
Acero alto de carbono	7,8	0,6 (4,1)	0,08	30 (210)	3,9
Molibdeno	10,2	0,2 (1,4)	0,02	52 (360)	5,1
tungsteno	19,3	0,62 (4,3)	0,03	58 (400)	3,0

Fuente: Borque Alberto, Nogueira Marar, 2007

Realizado por: Aguirre César, 2021

No olvidando que los materiales clasificados como: fibras son poli cristalinos o amorfos y cuentan con diámetros pequeños; considerando que los materiales fibrosos son generalmente polímeros o cerámicas (p.ej., aramida, vidrio, carbono, boro, óxido de aluminio y carburo de silicio). (Borque Alberto y Nogueira Marar, 2007, p.5 - 17)

## 1.8. Desgaste en pastillas de freno

Este tipo de desgaste en las pastillas de freno es una de las formas más importantes de la degradación de piezas y también de los elementos mecánicos, de los equipos industriales.

De tal forma que el desgaste es un efecto no deseado, que además de disipar parte de la energía mecánica producida, a lo largo del tiempo llega a deteriorar un órgano mecánico considerando de que éste no llegue necesariamente a la rotura parcial o completa.

Por consiguiente, a el desgaste se lo defino como: el daño superficial, sufrido por los materiales después de las determinadas condiciones de trabajo a los que son sometidos durante el proceso. En conclusión, el resultado del desgaste, es la pérdida de material y la subsiguiente disminución de las dimensiones y por lo tanto la pérdida de tolerancias. (Herrera Pablo y Culanata Gabriel, 2019, p.45)

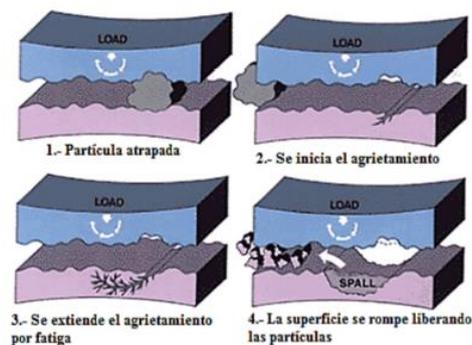
### 1.8.1. Mecanismos de desgaste

**Desgaste por fatiga de contacto:** esto ocurre cuando aquellas piezas son sometidas a elevados esfuerzos, los cuales llegan a provocar la aparición y propagación de grietas bajo la acción

repetitiva de estos.

Mientras que, en el caso de piezas sometidas a deslizamiento, las capas superficiales sufren intensas deformaciones como el resultado de la acción simultánea de las tensiones de contacto y de la fuerza de fricción.

Según Gras e Inglebert (1998), la fatiga de contacto se debe al apareamiento de transformaciones micro estructurales o descohesiones localizadas que conducen al daño de las superficies. (Picas Josep, 2017, p.28)

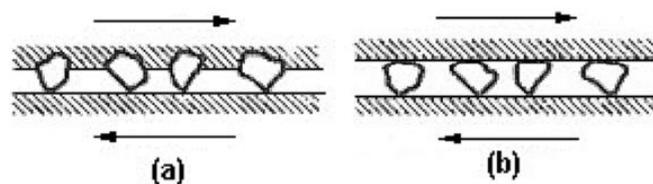


**Figura 31-1:** Proceso de fatiga por contacto

Fuente: Pall Corporation, 2015

Al inicio, las superficies están abolladas y por ende se inicia el agrietamiento. Además, que estas grietas se propagan después a estrés de manera repetidamente por la carga de apoyo, incluso sin el daño de las partículas adicionales. Finalmente, la superficie falla, produciendo una hendidura.

**Desgaste por abrasión:** ocurre cuando partículas duras suspendidas en un fluido o incrustadas en otra superficie ruedan o se deslizan bajo presión contra otra superficie. Las partículas duras pueden estar atrapadas entre dos superficies deslizantes que producen abrasión sobre ambas o sobre una de ellas.



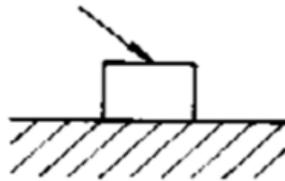
**Figura 32-1:** Desgaste abrasivo de los cuerpos

Fuente: Andrés Velasteguí, 2015

En la figura 32-1 (a) se muestra una clara abrasión de los cuerpos, no es más que es el desgaste

causado por rugosidades duras la cual es pertenecientes a una de las superficies en contacto y (b) es la abrasión a tres cuerpos, ya que el desgaste es provocado por partículas duras que están sueltas entre las superficies que se encuentran en movimiento relativo.

**Desgaste por deslizamiento:** por lo tanto, es todo aquel en el cual hay un movimiento relativo entre dos superficies en contacto con una carga aplicada, y donde el daño de la superficie no ocurre por rayado debido a la penetración de las asperezas o por partículas externas.



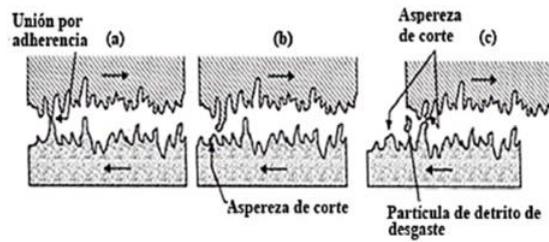
**Figura 33-1:** Ocurrencia de desgaste

**Fuente:** Universidad Tecnológica de Pereira

Se debe resaltar que durante el desgaste provocado por deslizamiento ya que pueden ocurrir transiciones en la tasa de desgaste influenciadas por la carga, velocidad y distancia de deslizamiento o también las condiciones ambientales tales como temperatura, humedad, entre otros. Tomando en cuenta que con el aumento de la carga normal ocurre una transición de desgaste moderado para un desgaste severo debido a la ruptura de la película de óxido ya que se ha formado durante el desgaste moderado.

Arriba de esta transición, el desgaste aumenta linealmente con la carga hasta que se provoca una segunda transición y donde el desgaste llega a cambiar de severo a moderado. Debido a esta segunda transición se da la presencia de una nueva película de óxido que se forma debido a las altas temperaturas de contacto y cuya estructura difiere de la estructura del óxido y de esta manera formando en el desgaste moderado.

**Desgaste adhesivo:** esto ocurre cuando dos superficies se deslizan, una contra otra bajo presión. Los puntos de contacto, las proyecciones microscópicas o la irregularidad de la unión en la interface y donde ocurre el deslizamiento debido a los altos esfuerzos localizados, y por consecuencia a estos llevan a que las fuerzas de deslizamiento fracturen la unión motivo por el cual se desgarran al material de una superficie y transfiriéndolo a otra, debido a esto se puede ocasionar posteriormente mayores daños. ( Picas Josep, 2017, p.29)



**Figura 34-1:** Desgaste adhesivo entre dos piezas en movimiento

Fuente: Análisis de fractura, 2011

**Desgaste por tribo-oxidación:** acción sobre la superficie de medios químicamente activos que se desprenden durante la fricción como resultado de la descomposición de los polímeros y los lubricantes. El desgaste tribo-químico en las operaciones de corte se deriva de la difusión. En general el desgaste tribo-químico aumenta con el aumento de la temperatura. Una causa frecuente del desgaste tribo-químico es la oxidación.

## **CAPÍTULO II**

### **2. MARCO METODOLÓGICO**

El presente proyecto busca ampliar el conocimiento teórico y general, el cual permite ampliar grandes avances al conocimiento humano, resultando esenciales para aportar al beneficio de nuestra sociedad, fundamentalmente para mejorar la calidad de vida de las personas, aportando un amplio conocimiento sobre el desgaste de las pastillas de freno, mediante este documento investigación.

Utiliza documentos, trabajos de integración curricular, artículos científicos de las diferentes revistas en línea en en “Google Académico”, “Dialnet”, la base de datos de ScienceDirect, etc. Mediante la introducción de palabras clave del tema seleccionado en lo que respecta a desgaste en pastillas de freno de vehículos utilitarios.

Además de realizar una comparación a los diferentes artículos científicos que tengan que ver con el análisis del desgaste en pastillas de frenos y luego se concluye de que método de análisis del desgaste es el que más reincide en los artículos científicos analizados.

#### **2.1. Criterios de inclusión**

- Artículos científicos con un máximo de seis años de haber sido publicados, libres de pago.
- Artículos que tenga preeminencia científica en idioma en inglés y español.
- Artículos que a pesar de ser escritos en años anteriores tengan actualmente evidencia acerca el tema.

#### **2.2. Criterios de exclusión**

- Artículos científicos publicados con posterior a los 7 años.
- Artículos que no tengan preeminencia científica.

#### **2.3. Metodología de búsqueda**

El trabajo en cuestión es un análisis sobre el desgaste de pastillas de frenos en vehículos utilitarios, se han seguido las siguientes fases que se desarrollaran a lo largo del trabajo:

**Fase 1:** En esta fase inicial se identifica claramente mediante bibliografías online todos los elementos que conforman una pastilla del tipo de material compuesto que conforman una pastilla para ser utilizados en vehículos utilitarios.

**Fase 2:** En esta siguiente fase se investiga todo lo que respecta a velocidad de desgaste que tiene este tipo de materiales que se puede ocasionar en vehículos utilitarios de acuerdo a bibliografías de manera online.

**Fase 3:** En esta tercera fase se investigará los principales mecanismos de desgaste que se generan durante el frenado con pastillas de material compuesto en vehículos utilitarios de acuerdo a fabricantes por medio de bibliografías online.

**Fase 4:** En esta última fase se realizará un análisis comparativo entre las principales marcas del mercado ecuatoriano y establecer que marca tiene un mejor desempeño al momento del frenado y cuál tiene un menor índice de desgaste.

## 2.4. Análisis de los artículos

**Tabla 1-2:** Artículos científicos extraídos

	Nombre de artículo científico	Autor	Año	Revista	País	Palabras clave	Resumen	Conclusiones	N° Referencias	Relevancia	Categorización (Ref. X Rel.)
1	Análisis de los principales mecanismos de falla en tres frenos de disco automotrices.	Msc. García Ricardo, Msc. Solano Eder, Msc. Blanco Edwin	2020	Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada.	México	Frenos de disco; Tribología; Microscopia; Mecanismos de falla.	En el presente estudio se analizaron los principales mecanismos de falla generados en la pista de frenado de 3 frenos de disco de uso comercial, teniendo en cuenta como par tribológico el sistema pastilla-pista.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los principales mecanismos de falla fueron identificados como el arado, el desprendimiento de material y las debris.</li> <li>- Se corroboró la presencia de óxidos de hierro que ayudan a la disminución del desgaste, debido a que se aglomeran a lo largo de la pista de frenado.</li> </ul>	12	1	12
2	Rendimiento de fricción y desgaste del hierro dúctil clasificado funcionalmente para pastillas de freno.	M. Polajnar, M. Kalin, I. Thorbjornsson, J.T. Thorgrimsson, N. Valle, A. Botor-Probierz	2017	Wear Journal	Eslovenia	Hierro dúctil graduado funcionalmente; Pastillas de freno automotrices; Formación del tercer cuerpo	En esta investigación se estudió en un experimento de validación en una máquina de freno de disco que imita condiciones realistas de contacto de freno, a varias temperaturas elevadas contra un disco de cerámica reforzado con carbono para comprender su comportamiento tribológico en una aplicación de freno de automóvil real.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El modelo de prueba de deslizamiento reveló que se lograba una mejor resistencia al desgaste y un coeficiente de fricción más estable después de eliminar una cierta cantidad de espesor del material de la superficie superior.</li> <li>- Las pruebas de frenos a escala reducida también se mostró que el desgaste se volvió estable y menos sensible a la temperatura de contacto después de quitar la superficie superior de la almohadilla y alcanzar alta dureza</li> </ul>	29	2	58
3	Diseño y construcción de un sistema para medir desgaste en forros de frenos de disco.	Zambrano Jorge, Villa Mariana, Buenaño Luis	2019	Revista Ciencia Digital	Ecuador	Forros; Disco; Frenos; Desgaste; Electrónico.	Este proyecto se encaminó al estudio, diseño y construcción de un sistema de control electrónico para medir el desgaste en los forros de las pastillas de frenos en un automóvil de competición.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mediante el diseño y construcción del sistema de control electrónico, se controló el desgaste que sufren los forros de las pastillas de frenos.</li> <li>- Se solucionó el problema que existía con los antiguos elementos que alertaban sobre el desgaste de los forros de las pastillas, los cuales provocaban daños en la superficie de los discos de frenos.</li> </ul>	14	1	14
4	Comportamiento avanzado de fricción-desgaste de pastillas de freno orgánicas.	Hasan Öktem, Ilyas Uygur	2019	Tribology Transactions	Turquía	Sistema de pastillas de freno; coeficiente de fricción; evaluación de microestructura; desgaste	Se investigó la influencia de un sistema de rendimiento en el comportamiento tribológico del material de las pastillas de freno orgánicas utilizando un sistema de prueba siguiendo la norma SAE J-661.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se desarrolló un nuevo sistema de prueba de pastillas de freno para identificar el comportamiento avanzado de fricción-desgaste.</li> <li>- El presente estudio obtuvo resultados que estaban dentro del rango aceptable para la norma SAE J-661 y, por lo tanto, demostró que el sistema se puede utilizar de manera eficiente y confiable para aplicaciones de fricción y desgaste</li> </ul>	30	2	60

5	Un estudio de tribómetro de clavija-sobre-disco de los pares de contacto de los frenos de disco con respecto al desgaste y las emisiones de partículas en el aire.	Jens Wahlström, Yezhe Lyu, Vlastimil Matjeka, Anders Söderberg	2017	Wear Journal	Suecia	Revestimiento; Freno de disco; Emisiones; Fricción; Materiales; Pin en disco; Desgaste	Se investigaron el desgaste y las emisiones de partículas de tres formulaciones novedosas de materiales de fricción. Se realizaron pruebas de clavija-sobre-disco para clasificar los nuevos materiales en términos de índice de desgaste específico y número de partículas y tasa de masa.	- La tasa de desgaste específica del disco recubierto de WC / CoCr fue ligeramente negativa, lo que indica que el material desgastado se transfirió desde la muestra del pasador - El resultado indica que es posible lograr una reducción del 50% en las emisiones de partículas en comparación con los materiales de referencia mediante el uso de un recubrimiento de disco de WC / CoCr.	24	1	24
6	Investigación sobre el rendimiento de frenado y el mecanismo de desgaste de pares de frenos completamente de carbono / cerámicos.	Xu Ma, Shangwu Fan, Haodong Sun, Chenghua Luan, Juanli Deng, Litong Zhang, Laifei Cheng	2020	Tribology International Journal	China	Freno; Coeficiente de fricción; Par completo de carbono / cerámica; Tasa de desgaste	En este trabajo, se examinó el rendimiento de frenado de pares íntegramente de carbono / cerámica que son adecuados para trenes de alta velocidad y automóviles.	- El mecanismo de desgaste de los pares de frenos completamente de carbono / cerámicos al frenar a diferentes presiones se regía por el desgaste abrasivo. - La introducción de una fase dúctil como FeSi2 en las pastillas de freno fue beneficiosa para disminuir el coeficiente de fricción del par completo de carbono / cerámica a un rango aceptable y de manera efectiva.	48	3	144
7	Evaluación del uso de lapinus y aramida en pastillas de freno.	Sigh T., Patnaik A.	2015	Archives of Civil and Mechanical Engineering	India	Aramida; Pastilla de freno; Desvanecerse; Lapinus; Recuperación.	La evaluación del rendimiento de frenado se realiza utilizando un protocolo de prueba estándar que cumple con la regulación ECE R-90 en la máquina de prueba de fricción Krauss. De manera integral, se encuentra que la incorporación de fibra de lapinus de silicato metálico superior en la formulación en relación con la aramida mejora la respuesta de fricción general.	- El aumento de la fibra de aramida condujo a un aumento de la densidad, dureza, energía de impacto, resistencia a la tracción y a la flexión cuando se complementa adecuadamente con fibra de lapinus. - El rendimiento de desgaste aumentó con el aumento de aramida, mientras que disminuyó cuando se incrementó la cantidad de lapinus en los compuestos de fricción.	35	2	70
8	Sustitución de cobre por grafito en pastillas de freno.	Gilardi Raffaele, Alzati Luigi	2015	Materials Journal	Italia	Pastilla de freno; Grafito; Ruido; Conductividad térmica	En este artículo se presentan los resultados de las pastillas de freno adheridas con resina con un enfoque en el rendimiento del ruido y la disipación de calor. Los ensayos experimentales se basan en modelos de materiales de fricción con una formulación conocida y un número reducido de componentes para una mejor identificación del papel del	- El grafito tiene un efecto positivo en la reducción de ruido. - Grafito con alta rugosidad superficial y mejor adherencia a la resina fenólica es más eficaz para reducir el ruido.	12	2	24

							tipo de grafito.				
9	Refuerzo en pastillas de freno con cáscara de avellana y polvos de boro.	Akincioglu G. y Oktem H.	2018	Arabian Journal for Science and Engineering	Arabia Saudita	Óxido de boro; Pastillas de freno; Prueba de compresibilidad; Polvo de cáscara de avellana; Ensayo de cizallamiento	Este estudio evaluó dos juegos de pastillas de freno automotrices sin asbesto producidas a partir de polvos de óxido de boro (6%) y cáscara de avellana (7%) y otros diecisiete componentes. Todos los ingredientes se mezclaron y prensaron para fabricar las pastillas de freno ecológicas.	- Los valores de dureza de las muestras cáscara de avellana y óxido de boro fueron similares y superiores a los de la muestra comercial. - Se puede decir que los valores de conductividad térmica de las almohadillas cáscara de avellana, óxido de boro y muestras convencionales estaban de acuerdo con normas nacionales.	35	1	35
10	Pastillas de freno sin cobre mediante la selección del tipo correcto de partículas de acero inoxidable.	Navnath Kalel, Bhaskar Bhatt	2020	Wear Journal	India	Pastillas de freno ecológicas; tribología; energía superficial.	En este trabajo, ecológico las pastillas de freno se desarrollaron con varios tipos de partículas de acero inoxidable para explorar la posibilidad de reemplazar el cobre de las pastillas de freno.	- Las pastillas de freno a base de partículas de acero mostraron una densidad, térmica ligeramente más baja conductividad y resistencia al cizallamiento en comparación con la basada en Cu - Las pastillas de freno a base de Cu demostraron ser superiores solo en rendimiento anti-desvanecimiento (relación de desvanecimiento más alta en ~ 10-15%) debido a una mayor conductividad térmica.	39	1	39
11	Falla inducida por desgaste de frenos de disco automotrices.	Ali Mohammadneja, Abbas Bahrami, Majid Goli, Hossein Nia, Peyman Taheri	2019	Materials Journal	Irán	Automóvil; Freno de disco; Falla; Desgaste	Este artículo investigó una falla en un freno de disco ventilado en un automóvil. El disco de freno averiado había estado en servicio durante aproximadamente 10 años. Se utilizaron microscopio óptico, microscopio electrónico de barrido (SEM) y espectroscopia de rayos X de dispersión de energía (EDS) para estudiar la microestructura del disco averiado.	- Las grietas se forman debido al desgaste y las condiciones de carga severas y se propagan perpendicularmente a la dirección de deslizamiento. - Se identificaron mecanismos de desgaste tanto abrasivos como adhesivos en muestras de clavija sobre disco	20	4	80
12	Modalidades de desgaste y mecanismos del material de freno compuesto de minería sin amianto.	Jiusheng Bao, Yan Yin, Zhencai Zhu, Minming Tong, Yuhao Lu, Yuxing Peng	2015	Applied Composite Materials Journal	China	Frenado de emergencia; Calor de fricción; Material de freno sin amianto; Mecanismo de desgaste; Modalidad de uso	Con el fin de mejorar la confiabilidad de frenado de los polipastos de mina, este documento realizó algunas investigaciones tribológicas sobre el material de los frenos de minería para revelar sus modalidades y mecanismos de desgaste.	- El estudio tiene principalmente cinco modalidades de desgaste: desgaste adhesivo, desgaste abrasivo, desgaste por corte, desgaste por fatiga y desgaste por altas temperaturas. - La reducción del calor de fricción debe ser un método técnico eficaz para disminuir el desgaste y evitar fallos de frenado.	15	3	45

13	Estudio comparativo de pastillas de freno de disco vendidas en el mercado indio - Impacto en aspectos de seguridad y medioambientales.	P. Baskara Sethupathi, J. Chandradass, M.A. Saibalaji	2021	Environment l Technology and Innovation Journal	India	Pastilla de freno; Ambiente; Desvanecerse; Metales pesados; Seguridad; Desgaste	El presente estudio incluyó pruebas de tres pastillas de freno de productores bien establecidos. En el estudio de análisis del aspecto de seguridad, las pastillas de freno se probaron según la norma SAEJ661a.	- Se observó presencia de metales pesados en los tres tipos de pastillas de freno, lo que parece ser bastante alarmante desde el punto de vista medioambiental. - Se encontró que la pastilla OE funciona mejor con respecto a la fricción y el desgaste.	40	1	40
14	Un estudio de los mecanismos de desgaste de las pastillas de freno de disco y zapata.	Laguna J., Juárez G., Calderón C., Velázquez V., Hernández I., Méndez J., Vite M.	2015	Engineering Failure Analysis Journal	México	Almohadilla de disco; Película de fricción; Almohadilla para zapatas; Tercera capa del cuerpo; Mecanismos de desgaste	En el presente trabajo se presentó un estudio y descripción de los mecanismos de desgaste implicados en discos. Estos fueron sometidos a un servicio real, aproximadamente 8 meses, en una ciudad como Poza Rica en México que es extremadamente cálida.	- Los mecanismos de desgaste identificados en las pastillas de disco fueron el deslizamiento y el desgaste por abrasión de tres cuerpos. - El análisis AFM presentó perfiles 3D de las variaciones de rugosidad de las superficies del disco	21	4	84
15	Selección inicial del material de las pastillas de freno de disco según el modo de temperatura.	Aleksander Yevtushenko, Piotr Grzes	2020	Materials Journal	Polonia	Frenado; método de elementos finitos; calentamiento por fricción; selección de material; temperatura; desgaste	Se desarrolló un modelo computacional espacial de un freno de disco de un vehículo de motor. La solución del sistema de ecuaciones se obtuvo mediante el método de elementos finitos para seis materiales de pastillas de freno diferentes asociados con el disco de hierro fundido durante un único frenado.	- Se realizó una simulación numérica del proceso de calentamiento por fricción del freno de disco durante el frenado simple. - Los cálculos también se pueden realizar para modos de temperatura media y alta	36	2	72
16	Rendimiento de fricción y desgaste de pastillas de freno de disco y recolección de energía piro eléctrica.	Yassine Tabbai, Amine Alaoui-Belghiti, Reddad El Moznine, Fouad Belhora, Abdelwahed Hajjaji	2021	International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology Journal	Korea	Pastillas de freno; Recolección de energía; Piroelectricidad; Detección de desgaste.	El objetivo principal de este trabajo es presentar un estudio basado en la modelización numérica que acopla los comportamientos termodinámicos y termoeléctricos de un disco de freno de automóvil para la predicción del desgaste de las pastillas de freno de disco y el tiempo de cambio	- El uso de cerámicas PZT para esta aplicación no solo se justifica por sus altísimas propiedades piroeléctricas y ferroeléctricas, sino también por sus muy económicas y fácilmente utilizables e integrables. - Demostró que la tensión eléctrica generada por el material piroeléctrico depende directamente de la temperatura e indirectamente del grosor del material y de la velocidad del automóvil.	34	2	68
17	Análisis térmico y estructural del conjunto del freno de disco durante un evento de frenado de parada única.	Ali Belhocine, Abd Rahim Abu Bakar, Mostefa Bouchetara	2016	Australian Journal of Mechanical Engineering	Argelia	Presión de contacto; Freno de disco; Elemento finito; Deformación	Este artículo tiene como objetivo determinar la temperatura del disco y examinar la concentración de esfuerzos, la deformación estructural y la presión de contacto del disco de	- Se concluye que el freno de disco de tipo ventilado es el mejor para la presente aplicación. - La presión de contacto se predice más alta en el lado delantero en comparación con el lado	15	1	15

						estructural	freno y las pastillas durante un evento de frenado único mediante el empleo de un software comercial de elementos finitos, ANSYS	trasero y su valor aumenta ligeramente con un aumento en las velocidades de rotación del disco.			
18	Fricción, desgaste y emisión de partículas en el aire de materiales de frenos sin Cu.	Yezhe Lyu, Mara Leonardi, Jens Wahlstrom, Stefano Gialanella, Ulf Olofsson	2020	Tribology International Journal	Suiza	Pastilla de freno libre de Cu; Material de fricción; Partículas; Desgaste	Se utiliza un tribómetro de clavija sobre disco para evaluar la fricción, el desgaste y la emisión de partículas en el aire de dos pastillas de freno comerciales sin Cu que se utilizan en Europa.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los materiales de freno probados con contenido de Cu y sin Cu producen un coeficiente de fricción comparable en la condición de prueba actual</li> <li>- Los materiales de freno probados con y sin Cu han formado capas de fricción compactas, compuestas por mesetas de contacto primarias y secundarias.</li> </ul>	49	1	49
19	Investigaciones experimentales sobre las propiedades de desgaste de los compuestos reforzados con palmiste para aplicaciones de pastillas de freno.	Satish Pujari, S. Sriikiran Department	2019	Defence Technology	India	Pastilla de freno; Materiales de fricción; Examen de dureza; Fibra de palmiste; Prueba de desgaste	Se está evitando el uso de material de amianto para fabricar las pastillas de freno, ya que es de naturaleza nociva y tóxica. Además, conduce a diversos problemas de salud. Estas pastillas de freno se pueden reemplazar por fibras naturales como palmiste (0–50%), rosas del Nilo (0–15%) y trigo (0–10%).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se obtuvieron mejores propiedades de desgaste al agregar un 5% de trigo en una fracción de volumen del 30% de fibra</li> <li>- Se puede concluir que las fibras naturales probadas pueden reemplazar al amianto en el refuerzo de los compuestos de fricción.</li> </ul>	20	1	20
20	Características de chirrido de las pastillas de freno desgastadas debido a la incrustación de arena de sílice en sus capas de fricción.	Mat Lazim, M. Kchaou, Abdul Hamid, Abu Bakar	2016	Wear Journal	Malasia	Pastillas de freno; Capa de fricción; Brecha; Efecto de tamaño de partícula; Arena de sílice; Ruido de chillido	El objetivo es estudiar los mecanismos de empotramiento de estas partículas de diferente tamaño en el caso de un sistema de pastillas / discos de freno para correlacionar su efecto con la fricción y el comportamiento dinámico.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Las partículas de arena de sílice modifican la interacción de contacto al cambiar el área de contacto efectivo</li> <li>- La superficie dañada aumentó con el aumento del tamaño de sílice.</li> </ul>	28	2	56
21	Evolución del mecanismo de desgaste en los discos de freno para reducir el desgaste y las emisiones de partículas.	Ran Cai a, Jingzeng Zhang a, Xueyuan Nie a, Jimi Tjong b, D.T.A. Matthews c	2020	Wear Journal	Canadá	Freno; Revestimiento cerámico; Emisión sin escape; Morfología superficial; Desgaste	La investigación se ha dirigido a obtener una superficie de disco dura y densa para reducir el desgaste abrasivo. Se utilizó una pastilla de freno sin amianto orgánico (NAO) para los tribotests	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A medida que la capa de transferencia estaba anclada por la superficie inducida por PEA, el comportamiento de desgaste del disco de freno y la pastilla NAO se alejó del abrasivo. El resultado de esta transición es que no se observó desgaste en la muestra tratada con PEA.</li> <li>- Los materiales de las pastillas también experimentaron un desgaste significativamente reducido en comparación con el material estándar de los discos de freno.</li> </ul>	36	2	72

22	Análisis microestructural y rendimiento de desgaste del compuesto de SiC reforzado con fibra de carbono para pastillas de freno.	Goo Byeong-Choon, Cho In-Sik	2017	Materials Journal	Korea	Compuesto C / C-SiC; Fricción; Microestructura; Espectroscopía Raman; Desgaste	En este estudio, se evaluó el comportamiento de fricción y desgaste del compuesto C / C-SiC utilizando un comprobador de fricción de bola sobre disco en condiciones secas de deslizamiento alternativo a diferentes temperaturas de 25, 100 y 200 ° C.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El coeficiente de fricción de la muestra de C / C-SiC a 25 °C fue muy estable con un valor de aproximadamente 0,16, mientras que los coeficientes de fricción a 100 y 200 °C fueron inestables.</li> <li>- La resistencia al desgaste disminuyó al aumentar la temperatura. Se reveló que el mecanismo de desgaste del C / C-SiC contra el acero SAE52100 es un modo abrasivo.</li> </ul>	25	4	100
23	Sistema pastilla-disco de frenado: Mecanismos de desgaste y formación de fragmentos de desgaste.	Piyush Chandra Verma, Luca Menapace, Andrea Bonfanti, Rodica Ciudin, Stefano Gialanella, Giovanni Straffelini	2015	Wear Journal	Italy	Sistemas de frenos; Coeficiente de fricción; Pin en disco; Use escombros; Pruebas de desgaste	El presente estudio se centra en el comportamiento tribológico de un material de almohadilla de fricción comercial que se desliza en seco contra un disco de hierro fundido.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El principal mecanismo de desgaste del disco es la trioxidación, con un aporte de adherencia, siendo la hematita el principal óxido de hierro que se forma.</li> <li>- Todo el proceso de desgaste y la correspondiente formación de fragmentos de desgaste que abandonan el sistema tribológico está principalmente controlado por la ruptura de las mesetas secundarias.</li> </ul>	33	2	66
24	Comportamiento de desgaste de compuestos ecológicos sin amianto para materiales de frenos de automóviles.	Ashok Kumar Ilanko, Srinivasan Vijayaraghavan	2016	Friction Journal	India	Coeficiente de fricción; Compuestos ecológicos; Materiales de fricción de frenos sin amianto; Desgaste	El objetivo de este trabajo es estudiar el comportamiento de desgaste de tres materiales de pastillas de freno estos son: compuestos fenólicos reforzados con fibra de lino (FFRC), compuestos fenólicos reforzados con fibra de basalto (BFRC) y compuestos fenólicos híbridos reforzados con lino / basalto (HFRC).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El desgaste máximo en el régimen de desgaste suave de BFRC es de 1,6 µm, en comparación con 3,5 µm para FFRC y 6,4 µm para HFRC.</li> <li>- El mapa del mecanismo de desgaste desarrollado utilizando el método de agrupamiento difuso demostró ser una herramienta eficaz en el estudio del comportamiento de desgaste de los materiales.</li> </ul>	30	1	30
25	Mecanismo de desgaste de materiales de fricción de freno ecológicos reforzados con fibra de lino / basalto.	Ashok Kumar Ilanko, Srinivasan Vijayaraghavan	2017	Tribology - Materials, Surfaces and Interfaces Journal	India	Compuestos de resina fenólica; Compuestos reforzados con basalto y lino	En el presente estudio, se estudió el mecanismo de desgaste de los compuestos fenólicos reforzados con fibra de lino y basalto utilizando un probador de desgaste de clavija sobre disco.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- De los tres compuestos utilizados en este estudio, se encuentra que BFRC es una mejor opción para el material resistente al desgaste que puede ser adecuado para aplicaciones de pastillas de freno.</li> <li>- El planchado es el mecanismo dominante en el régimen de desgaste, mientras que el arado y la fractura de la matriz son dominantes en el régimen de desgaste severo.</li> </ul>	26	1	26

## **2.5. Análisis de resultados de artículos con mayor categorización**

En esta sección se realiza el análisis de los artículos que tienen un mayor índice de categorización basándose en referencia con el tema a tratar de este trabajo de integración curricular.

### **2.5.1. *Investigación sobre el rendimiento de frenado y el mecanismo de desgaste de pares de frenos completamente de carbono/cerámicos.***

En este trabajo, se examina el rendimiento de frenado de pares íntegramente de carbono / cerámica que son adecuados para trenes de alta velocidad y automóviles. Según los resultados, la introducción de una fase dúctil como FeSi<sub>2</sub> (ferrosilicio) en las pastillas de freno fue beneficiosa para disminuir el coeficiente de fricción a un rango aceptable y mejoró efectivamente la resistencia al desgaste. (X. Ma, S. Fan, H. Sun, p. 1, 2020)

#### **2.5.1.1. *Preparación de pares de frenos***

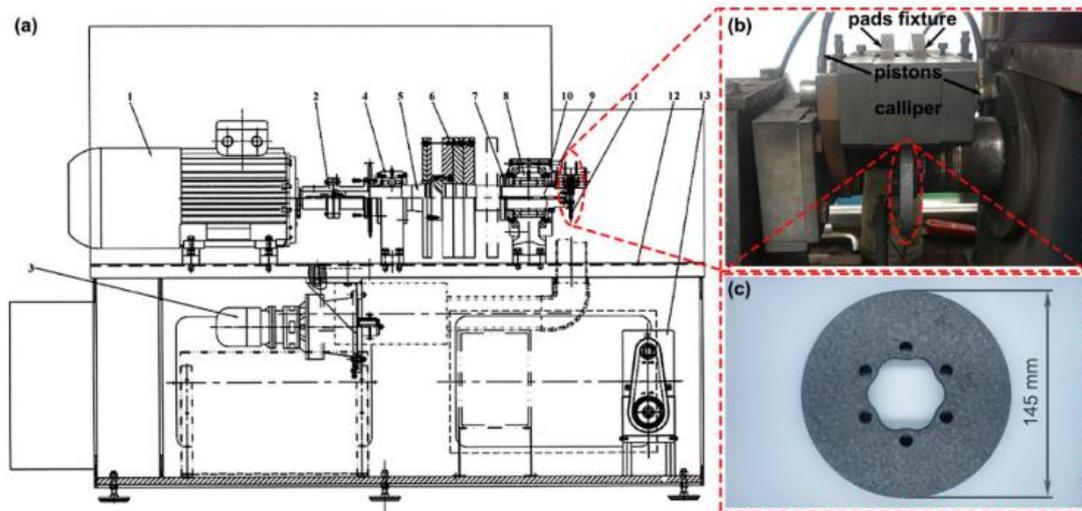
El disco y las pastillas de carbono / cerámica se prepararon en cuatro pasos. Primero, Se utilizaron fibras de carbono a base de poliacrilonitrilo (PAN) para preparar fieltros de carbono punzonados tridimensionales. La tela de fibra no tejida de 0 °, la red de fibra cortada y la tela de fibra no tejida de 90 ° se apilaron y perforaron alternativamente paso a paso.

A continuación, las preformas de carbono 3D obtenidas se trataron mediante el proceso de infiltración química de vapor (CVI) para depositar carbono pirolítico (PyC) sobre las fibras de carbono. Después de eso, los compuestos de C / C (carbono / cerámica) porosos tal como se recibieron se mecanizaron al tamaño del disco de freno y las pastillas. Finalmente, el disco C / C y las almohadillas se infiltraron con polvos de aleación de silicio puro o FeSi<sub>75</sub> (Silicato férrico 75%) mediante el proceso de infiltración de fusión reactiva (RMI).

El proceso de infiltración se lleva a cabo a 1450-1650 °C durante 0,5-2 h en un ambiente de vacío. Después del proceso de infiltración de la masa fundida, la superficie del disco y las almohadillas se trituraron con una máquina rectificadora de superficies. Para mayor claridad, el disco preparado de C / C – SiC (carbono / carburo de silicio reforzado con fibra de carbono), las almohadillas de C / C – SiC y las almohadillas de C / C – SiC modificadas con FeSi<sub>2</sub> se denominan SD, SP y SD, SP y FP, respectivamente.

### 2.5.1.2. Pruebas de frenado

Se probó el rendimiento de frenado de dos pares (SD-SP y SD-FP) en un dinamómetro de escala de laboratorio tipo disco de almohadillas. Las pruebas se llevaron a cabo utilizando un disco giratorio y dos almohadillas estáticas. Un diagrama esquemático del dinamómetro y una imagen del disco se muestra en la Figura 1-2.



**Figura 1-2:** Diagrama del dinamómetro e imagen real del disco de freno.

Fuente: X. Ma, S.Fan, H. Sun, 2020

(a) diagrama esquemático; (b) imagen del componente del freno; (c) disco de freno; (1) motor principal; (2) acoplamiento; (3) dispositivo de conducción de velocidad ultra baja; (4) calzo de cojinete izquierdo; (5) husillo; (6) juegos de volantes; (7) dispositivo de medición de temperatura; (8) calzo de cojinete derecho; (9) calibre; (10) accesorio de pinza; (11) disco de freno; (12) marco; (13) generador de presión de frenado

El tamaño del disco y las almohadillas son  $\Phi 145$  mm x 12 mm y 40 mm x 20 mm x 13 mm, respectivamente. La eficacia de frenado de los dos pares se examina en primer lugar de acuerdo con la prueba AK-master (basada en SAE-J2522).

Las condiciones de prueba detalladas se describen en la norma SAE-J2522 y se enumeran en la Tabla 2-2.

Para dominar las propiedades de fricción y el mecanismo de desgaste de los pares de frenos completamente de carbono / cerámica en diferentes condiciones, se llevaron a cabo pruebas repetidas a diferentes velocidades de frenado. y presión. Los detalles del esquema de prueba se

diseñaron en base a las subsecciones de SAE-2522 y se resumen en la Tabla 2-2.

**Tabla 2-2:** Condiciones de prueba de SAE-J2522

Secciones	Nombre de la prueba	Condiciones
1	Característica verde $\mu$	80 → 30 km / h; 3,0 MPa; 30 paradas
2	Bruñido	80 → 30 km/h; 1.5–5.1 MPa; 64 paradas
3	Valor característico 1	80 → 30 km / h; 3,0 MPa; 6 paradas
4	Sensibilidad a la velocidad / presión	40 → 5 km/h; 1.0–5.0 MPa; 5 paradas
5		80 → 40 km/h; 1.0–5.0 MPa; 5 paradas
6		120 → 80 km/h; 1.0–5.0 MPa; 5 paradas
7		160 → 130 km/h; 1.0–5.0 MPa; 5 paradas
8		180 → 150 km/h; 1.0–5.0 MPa; 5 paradas
9	Valor característico 2	80 → 30 km/h; 3.0 MPa; 6 paradas
10	Frenado en frío	40 → 5 km/h; 3.0 MPa; 1 parada
11	Frenado en autopista	100 → 5 km/h; 160 → 10 km/h; 60% desaceleración; 2 paradas
12	Valor característico 3	80 → 30 km/h; 3.0 MPa; 18 paradas
13	1er desvanecimiento	100 → 5 km/h; 40% desaceleración; 15 paradas
14	Recuperación 1	80 → 30 km/h; 3.0 MPa; 18 paradas
15	Sensibilidad a la temperatura / presión 100 ° C	80 → 30 km/h; 1.0–5.0 MPa; 5 paradas
16	Sensibilidad a la temperatura / presión 500 ° C	80 → 30 km/h; 1.0–5.0 MPa; 9 paradas; aumento de temperatura
17		80 → 30 km/h; 1.0–5.0 MPa; 5 paradas
18	Recuperación 2	80 → 30 km/h; 3.0 MPa; 18 paradas
19	2do desvanecimiento	100 → 5 km/h; 40% desaceleración; 15 paradas
20	Recuperación 3	80 → 30 km/h; 3.0 MPa; 18 paradas

Fuente: X. Ma, S. Fan, H. Sun, 2020

Realizado por: Aguirre César, 2021

**Tabla 3-2:** Esquema de prueba basado en subsecciones de SAE - J2522

	Condición de frenado		Repeticiones
	Velocidad de frenado (km / h a km / h)	Presión de frenado (MPa)	
Sensibilidad a la velocidad de frenado	40 a 5	3.0	60
	80 a 40		60
	120 a 80		60
	160 a 130		60
	180 a 150		60
Sensibilidad a la presión de frenado	80 a 40	1.0	60
		2.0	60
		3.0	60
		4.0	60
		5.0	60

Fuente: X. Ma, S. Fan, H. Sun, 2020

Realizado por: Aguirre César, 2021

### 2.5.1.3. Resultados de el rendimiento de frenado y el mecanismo de desgaste de pares de freno

Características básicas del disco de freno y las pastillas preparadas antes de las pruebas de frenado se enumeran en la Tabla 4-2.

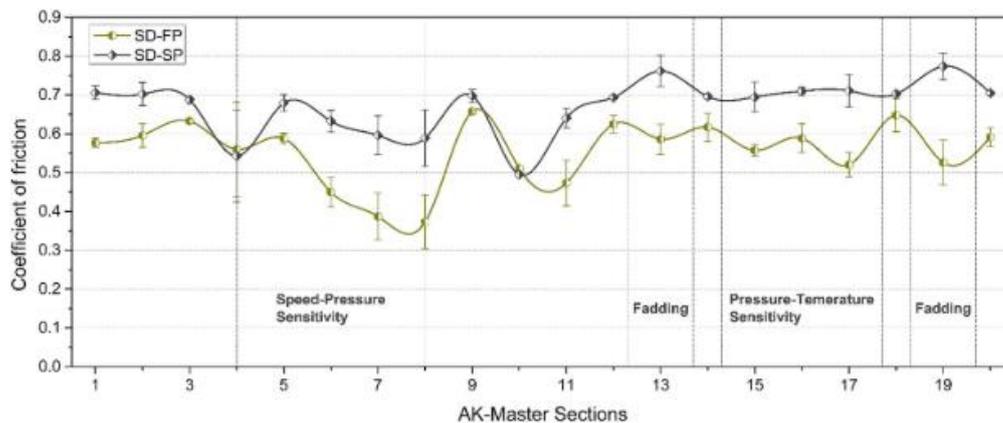
**Tabla 4-2:** Densidad y porosidad abierta de discos y pastillas de freno

	Densidad (g / cm <sup>3</sup> )	Porosidad abierta (% vol.)	Rugosidad superficial Sa (µm)
SD	2.14	5.38	2.27
SP	2.06	6.76	2.37
FP	2.48	3.31	2.46

Fuente: X. Ma, S. Fan, H. Sun, 2020

Realizado por: Aguirre César, 2021

En la siguiente Figura 2-2 se puede observar la variación del coeficiente de fricción (COF) promedio en diferentes secciones de las pruebas a los 3 tipos de materiales que se analizaron para este estudio.



**Figura 2-2:** Variación del COF promedio en diferentes secciones de prueba

Fuente: X. Ma, S. Fan, H. Sun, 2020

El par original de carbono / cerámica (es decir, SD-SP en este trabajo) posee un COF relativamente alto y exhibe insensibilidad a la velocidad o presión de frenado. El COF alto no era apropiado para la aplicación de un sistema de disco de almohadilla de este tipo para trenes o automóviles. Por el contrario, el COF de SD-FP podría reducirse a menos de 0,5 en el frenado a alta velocidad. Las tasas de desgaste de SD-FP fueron mucho más bajas que las de SD-SP casi en todas las condiciones de frenado probadas, especialmente en frenadas con mucha energía.

Debido a las pruebas realizadas en esta investigación se obtuvo restos de desgaste de SD – SP, como se muestra en la Tabla 5-2.

**Tabla 5-2:** Composición de elementos de los restos de desgaste adquiridos de SD-SP

Velocidad de frenado (km / a km / h)	40 a 50	80 a 40	120 a 80	160 – 130	180 a 150
Contenido de C (%)	90.34	87.23	86.61	81.53	79.11
Contenido de O (%)	4.37	5.62	9.08	14.19	17.69
Contenido de Si (%)	5.29	7.12	4.31	4.28	3.20

Fuente: X. Ma, S. Fan, H. Sun, 2020

Realizado por: Aguirre César, 2021

Debido a las pruebas realizadas en esta investigación se obtuvo restos de desgaste de SD – FP, como se muestra en la Tabla 6-2.

**Tabla 6-2:** Composición de elementos de los restos de desgaste adquiridos de SD-FP

Velocidad de frenado (km / a km / h)	40 a 5	80 a 40	120 a 80	160 – 130	180 a 150
Contenido de C (%)	76.58	73.61	62.01	71.54	55.28
Contenido de O (%)	16.62	18.25	29.79	23.77	28.22
Contenido de Si (%)	6.36	7.63	7.62	4.69	14.92
Contenido de Fe (%)	0.44	0.51	0.58	-	1.28

Fuente: X. Ma, S. Fan, H. Sun, 2020

Realizado por: Aguirre César, 2021

El mecanismo de desgaste de los pares de frenos completamente de carbono / cerámicos al frenar a diferentes presiones se regía por el desgaste abrasivo. El COF de los pares íntegramente de carbono / cerámica no fue sensible a la presión de frenado. Cuando la presión de frenado alcanza 5,0 MPa, la superficie de fricción de SP queda totalmente destruida mientras que la de FP mantiene su integridad. La resistencia al desgaste de SD-FP fue mucho mejor que SD-SP

Los pares de carbono / cerámica que se utilizan actualmente no son perfectamente adaptado al sistema de frenado de disco de pastillas de trenes o automóviles. De acuerdo con el análisis del rendimiento de frenado y del mecanismo de desgaste en este trabajo, las deficiencias se pueden solucionar agregando una fase dúctil a las pastillas de freno para mejorar la resistencia al desgaste.

### **2.5.2. Sistema pastilla-disco de frenado: Mecanismos de desgaste y formación de fragmentos de desgaste**

El presente estudio se centra en el comportamiento tribológico de un material de pastilla de fricción comercial que se desliza en seco contra un disco de hierro fundido.

Se utiliza un equipo pin-on-disc (clavija – sobre – disco) para investigar las propiedades tribológicas y el mecanismo de desgaste de material de fricción de pastillas de freno orgánico sin amianto (NAO) comercial que se desliza en seco contra un disco de hierro fundido, bajo diferentes

condiciones de carga.

#### 2.5.2.1. *Materiales y procedimientos en el sistema pastilla - disco*

En este trabajo se utiliza un material de almohadilla NAO comercial y un yeso gris. Se utilizaron discos de hierro para las pruebas de desgaste.

La Tabla 7-2 proporciona los resultados de la composición elemental de la pastilla de freno, medida por espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF). Las concentraciones que no suman cien como elementos ligeros, como el carbono y el oxígeno, no fueron cuantificadas, ya que sus fotones de rayos X característicos no fueron detectables.

**Tabla 7-2:** Composición elemental del material de la pastilla de freno medidos por XRF

Elemento.	Peso %
Mg	2.8
Al	3.2
Si	1.7
S	1.3
K	2.3
Ca	1.0
Ti	5.2
Fe	8.3
Cu	7.5
Zn	2.1
Zr	22.7
Sn	1.9
Ba	2.9
Bi	0.6
Sb	0.9

**Fuente:** Chandra Verma, 2015

**Realizado por:** Aguirre César, 2021

Todas las fases identificadas se enumeran en la Tabla 8-3, donde también se indican las concentraciones de los componentes. Se calcula a partir de los datos XRF (Tabla 7-3), de acuerdo con la estequiometría de los diversos compuestos. Se puede notar claramente la presencia de una cantidad bastante grande de óxido de circonio. En la misma tabla también se especifica su papel principal en el comportamiento de deslizamiento de la almohadilla.

Las pruebas de deslizamiento en seco se llevaron a cabo a temperatura y humedad ambiente estándar, en un dispositivo de prueba de clavija sobre disco.

**Tabla 8-2:** Concentraciones de los compuestos en el material de las pastillas de freno

Componentes (Rol)	Peso %	Componentes (Rol)	Peso %
Óxido de circonio (abrasivo)	31.0	Carbonato de calcio (relleno)	2.5
Silicato de Al, Mg y Zr (refuerzo n/ abrasivo)	9.5	Sulfuro de estaño (lubricante sólido)	2.5
Acero Low-C (refuerzo)	8.0	Zinc (refuerzo)	2.0
Cobre (conducción de calor, refuerzo, lubricación sólida a alta temperatura)	7.5	Óxido de aluminio (abrasivo)	3.0
Vermiculita (relleno)	6.0	Sulfuro de hierro (lubricante sólido)	0.5
Baritas (relleno)	5.0	Resina orgánica, grafito	Equilibrado
Titanato de potasio (lubricante sólido)	5.0	Fibras y a base de carbono	

**Fuente:** Chandra Verma, 2015

**Realizado por:** Aguirre César, 2021

Como material de contracara se utiliza un disco de hierro fundido gris perlítico-bainítico con una dureza de  $350 \pm 11$  HV60. Se mecaniza pasadores cilíndricos a partir de la pastilla de freno (Fig.3-2). Tenían un diámetro de  $6.2 \pm 0.2$  mm y una altura de  $7 \pm 2$  mm.



**Figura 2-2:** Muestra de pasador de pastilla de freno.

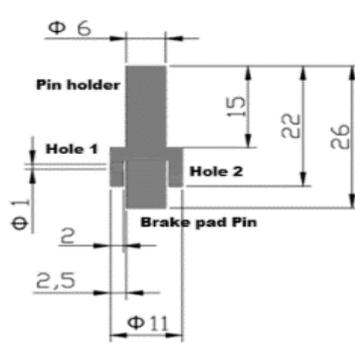
**Fuente:** Chandra Verma, 2015

La prueba de desgaste se realiza a una velocidad de deslizamiento,  $v$ , de 3,14 m/s y durante 50 min, para una distancia total de 9000 m. Se investiga dos presiones de contacto nominales medias,  $p_o$ : 0,5 y 2 MPa. Los valores de  $p_o v$  eran entonces de 1,57 y 6,24 MPa m/s, un rango adecuado para investigar el comportamiento de estos materiales y sistemas, ya que en los sistemas de frenos reales los valores de  $p_o v$  suelen estar entre 0,3 y 20 MPa m/s. El desgaste del pasador se midió comprobando su peso,  $W$ , antes y después de cada ensayo utilizando una balanza analítica con una precisión de  $10^{-4}$ .

A continuación, los datos se convierten en volúmenes de desgaste usando una densidad medida del material de la almohadilla igual a 2,8 g/cm<sup>3</sup>. El desgaste del disco se mide con un perfilómetro, que se utiliza para evaluar la sección transversal de la huella de desgaste.

Durante cada prueba, el coeficiente de fricción se registra continuamente con la evolución de la temperatura de contacto. Para ello, se colocaron dos termopares de tipo cromo-alumel en dos

orificios taladrados en el porta-clavijas a una distancia de 4 y 6 mm de la superficie de contacto de la clavija con el disco (ver Fig. 4-2).



**Figura 4-2:** Dimensiones del pasador y del soporte del pasador.

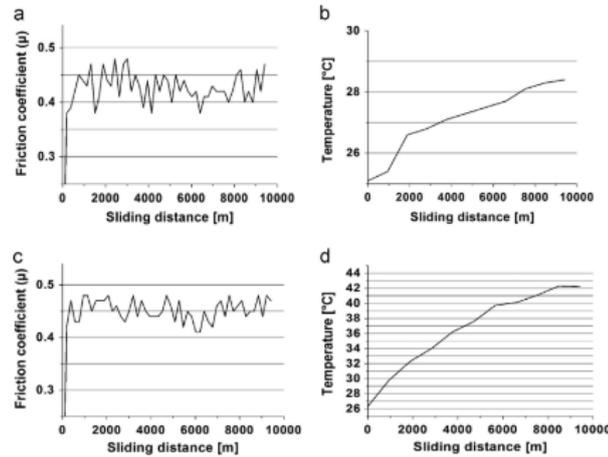
Fuente: Chandra Verma, 2015

Para estimar la temperatura de contacto, se considera que el flujo de calor por fricción era unidimensional y luego se supuso que la temperatura disminuía linealmente desde la superficie de contacto hacia arriba. Las morfologías de la superficie de las almohadillas gastadas se examinaron en un microscopio electrónico de barrido (SEM).

Para eliminar cualquier efecto de carga superficial, las muestras SEM se recubren con una fina capa de carbono u oro. SEM también se utiliza para examinar la micro estructura y la composición, esta última mediante espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDXS), de los restos de desgaste recogidos. Los escombros de desgaste también estaban cubiertos de carbono. Los patrones de difracción de rayos X utilizando radiación  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda/1.5406\text{\AA}$ ) con filtro de Ni, necesarios para ser adquiridos en el modo de transmisión. De hecho, los restos de desgaste se colocaron en un diámetro de 1 mm. tubo capilar de vidrio. Los datos de difracción se calcularon utilizando un procedimiento de ajuste de patrón completo basado en el método de Rietveld.

#### 2.5.2.2. Resultados del sistema pastilla-disco de frenado

La figura 5-2 muestra las curvas de evolución típicas del coeficiente de fricción y temperatura del pasador para las condiciones de carga, es decir, a 0,5 y 2 MPa, en función de la distancia de deslizamiento. Después de una breve etapa de rodaje, el coeficiente de fricción alcanza un valor de estado estable en el rango de 0.43–0.44 y casi independiente de la presión de contacto nominal. Por el contrario, se observa que la temperatura aumenta continuamente con la distancia de deslizamiento y se alcanza un valor de estado estable solo al final de cada prueba.



**Figura 5-2:** Distancia de deslizamiento en función del coeficiente de fricción

Fuente: Chandra Verma, 2020

Las variaciones de (a, c) coeficiente de fricción y (b, d) temperatura de contacto en función de la distancia de deslizamiento para las pruebas de desgaste de pasador sobre disco realizadas a 0.5 MPa (a, b) y 2 MPa (c, d) respectivamente.

Estos valores de temperatura, obviamente más altos que las temperaturas promedio de los pines, eran de esperar en vista del fuerte aumento de temperatura reportado en la parte de la superficie del pasador en contacto más cercano con el disco, un efecto que es compatible con el carácter casi aislante del material de la clavija. Los valores promedio registrados del coeficiente de fricción y las temperaturas promedio de los pasadores se enumeran en la Tabla 9-2.

**Tabla 9-2:** Parámetros detallados de la prueba de desgaste pin-on-disc

Presión de contacto (MPa)	Coefficiente de fricción medio	Temperatura promedio del pin (1C)	Tasa de desgaste del pasador (Peso) (mm <sup>3</sup> /mm)	Coefficiente de desgaste específico (pasador) (m <sup>2</sup> /N)	Coefficiente de desgaste específico (disco) (m <sup>2</sup> /N)
0.5	0.44	30	$1.62 \times 10^{-7}$	$9.86 \times 10^{-15}$	$7.72 \times 10^{-15}$
2	0.43	45	$3.93 \times 10^{-7}$	$6.01 \times 10^{-15}$	$6.66 \times 10^{-15}$

Fuente: Chandra Verma, 2020

Realizado por: Aguirre César, 2021

El principal mecanismo de desgaste del disco es la trioxidación, con un aporte de adherencia, siendo la hematita el principal óxido de hierro que se forma. También una mezcla de abrasión y desgaste por fragmentación frágil está activa en la superficie del pasador.

Las temperaturas de contacto comparativamente bajas, obtenidas para cada condición, a partir de tres pruebas de desgaste, confirman un régimen típico de desgaste por deslizamiento suave.

### **2.5.3. *Falla inducida por desgaste de frenos de disco automotrices***

Este artículo investiga una falla en un freno de disco ventilado en un automóvil. El disco de freno averiado había estado en servicio durante aproximadamente 10 años. El kilometraje cuando se informa de la falla era de 100.000 km. La falla observada es en forma de grietas radiales que parecían haberse iniciado en el borde exterior del freno de disco. Las grietas eran bastante rectas sin ramificaciones.

#### **2.5.3.1. *Materiales y métodos utilizados en la falla inducida por desgaste***

Se corta muestras para caracterizaciones micro estructurales y de propiedades mecánicas de un freno de disco averiado, utilizando mecanizado por electro descarga (EDM). Se utiliza microscopios ópticos, microscopio electrónico de barrido (SEM) y espectroscopia de rayos X de dispersión de energía (EDS) para estudiar la microestructura y los mecanismos de desgaste en el disco fallado. La superficie de fractura de las muestras fallidas también se estudió mediante SEM.

La dureza de las muestras se mide utilizando una prueba de micro dureza Vickers. Se utiliza un perfilómetro láser para investigar la topología de la superficie de las muestras fallidas. Para investigar más a fondo la correlación entre la microestructura y el comportamiento de desgaste de las muestras, se lleva a cabo una prueba de desgaste pin-on-disc en muestras de 50 mm de diámetro a temperatura ambiente, utilizando un pin de acero endurecido AISI 52100, con 5 mm de diámetro y dureza 64 RC.

Las pruebas de desgaste se realizaron en el lado que no estaba en contacto con la almohadilla. Primero, se llevaron a cabo algunas pruebas de desgaste de prueba con diferentes cargas para encontrar la carga a la que la prueba de desgaste arrojó resultados en un tiempo razonable. Las cargas se cambiaron en las pruebas de prueba de 10 a 60 N.

Cada prueba se ejecutó durante 50 m. Al final, las pruebas se realizaron con cargas de 20 y 40 N. Los resultados mostraron que los experimentos con cargas por debajo de 10 N tomaron mucho tiempo para ver cambios menores en el peso de la muestra.

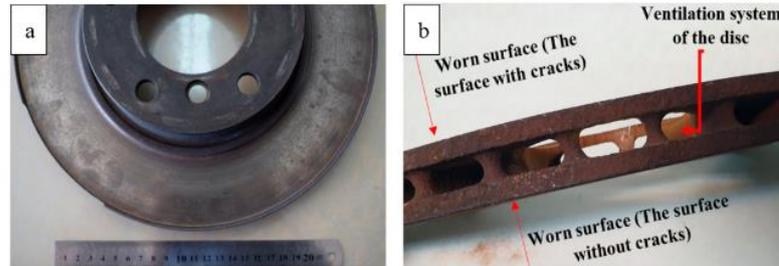
En el otro extremo, cargas superiores a 60 N dieron como resultado una deformación rápida y un desgaste excesivo durante unos minutos, de tal manera que apenas se pudo extraer de la prueba información.

Las pruebas continuaron hasta 1000 m. Las pruebas de desgaste se interrumpieron cada 250 m

para medir la pérdida de peso. Se eligió que la velocidad del pasador en movimiento en el disco fuera una cantidad constante de 0,25 m / s.

### 2.5.3.2. Antecedentes del caso

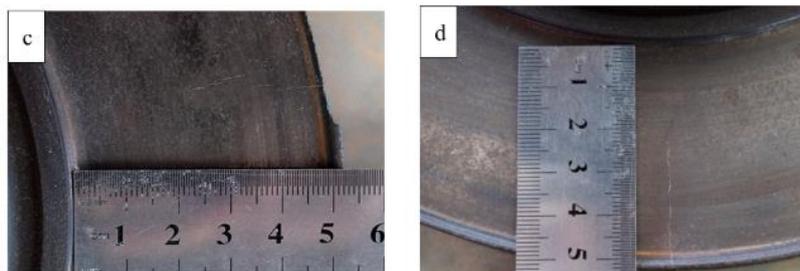
La falla, en este caso, estuvo relacionada con la fundición gris (Fe-3.3% C, 2.1% Si, 2.2% Mn, 0.2% P y 0.1% S, dado por el proveedor) freno de disco en un automóvil. (ver Figura 6-2).



**Figura 6-2:** Imágenes ópticas del disco

**Fuente:** Mohammadnejad Ali, Bahrami Abbas, 2019

El disco había estado en funcionamiento con variaciones de temperatura entre -10 °C (en invierno) y 35 °C (en verano) en una atmósfera bastante seca. El disco era ventilado y estaba fundido con dos lados en contacto con la plataforma de ruptura simultáneamente. Sin embargo, las microgrietas se formaron solo en un lado. La falla observada fue en forma de grietas radiales. Había dos grietas bastante grandes, una de aproximadamente 30 mm y la otra de alrededor de 40 mm. (ver Figura 7-2)



**Figura 7-2:** Imágenes de las grietas en la superficie del disco de freno

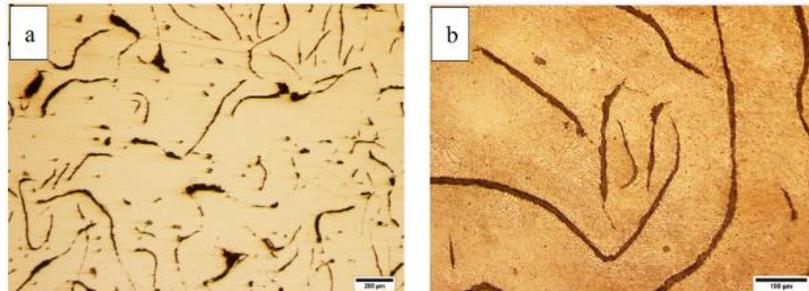
**Fuente:** Mohammadnejad Ali, Bahrami Abbas, 2019

### 2.5.3.3. Resultados de la falla inducida por desgaste de frenos de disco

La Figura 8-2 muestra imágenes de microscopio óptico del disco antes y después del grabado. Como se muestra, grafito las escamas se distribuyen en una matriz de perlita. Las escamas de

grafito son excelentes conductores térmicos, lo que hace que los hierros grises también sean buenos conductores térmicos.

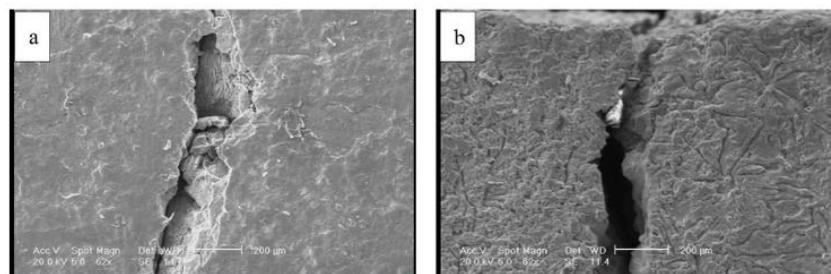
Además, se sabe que las escamas de grafito absorben los sonidos creados por los contactos de la pastilla de freno y el disco de freno.



**Figura 8-2:** Imágenes de microscopio óptico

**Fuente:** Mohammadnejad Ali, Bahrami Abbas, 2019

La Figura 9-2 muestra las imágenes SEM de grietas en la superficie del disco desde la vista superior y desde la sección transversal. La imagen (a) muestra que las aberturas de grietas en la superficie en algunas áreas eran tan grandes como 200 µm. La imagen (b) es de la sección transversal de la grieta. No hubo ramificaciones ni desviaciones importantes de la línea recta.

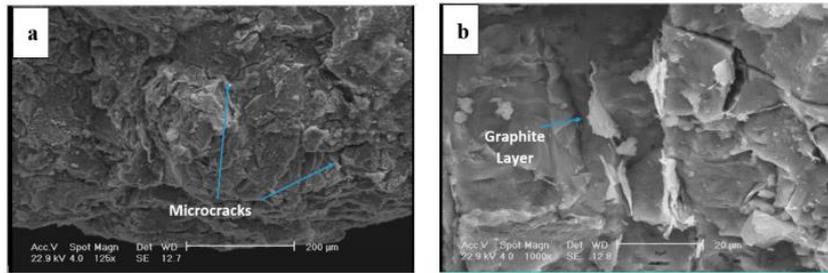


**Figura 9-2:** Imágenes de microscopio (SEM) de la grieta

**Fuente:** Mohammadnejad Ali, Bahrami Abbas, 2019

Los bordes afilados en la superficie eran indicaciones de corte de la superficie y desgaste abrasivo en la superficie.

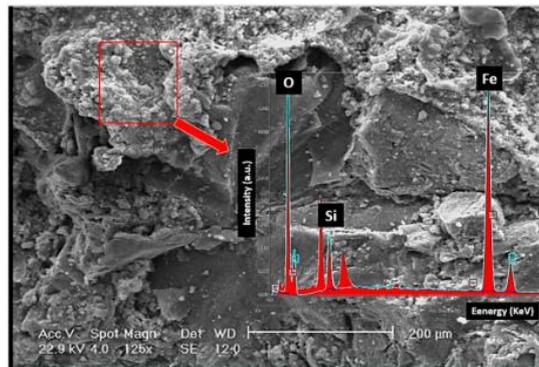
La Figura 10-2 muestra la superficie de fractura del disco. La fractura es en general frágil con una estructura en capas, esto es respecto a la imagen (a). La superficie de la fractura se cubrió con una red de micro fisuras finas. La interface matriz-grafito, en la que la matriz se refiere a la perlita, es un lugar adecuado para la iniciación de grietas. En la imagen (b) se aprecia que la fractura se había iniciado principalmente desde la interfaz grafito/matriz.



**Figura 10-2:** Imágenes SEM de la superficie de fractura en el disco

**Fuente:** Mohammadnejad Ali, Bahrami Abbas, 2019

Los resultados de EDS en la Figura 11-2 muestran que estas partículas eran principalmente partículas de óxido que contienen Fe y Si. Estas partículas se formaron durante el desgaste de la superficie y el desprendimiento de las partículas. Esto ocurre mientras que la alta temperatura del disco durante el contacto de la almohadilla y el disco dio como resultado la difusión de los átomos de oxígeno en la red y la oxidación de las partículas.

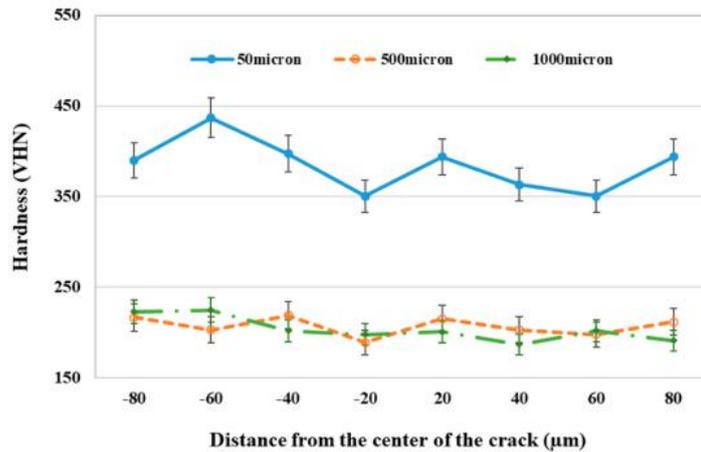


**Figura 11-2:** Análisis EDS de las partículas de óxido

**Fuente:** Mohammadnejad Ali, Bahrami Abbas, 2019

Estas partículas pueden causar una abrasión severa en caso de que queden atrapadas entre dos componentes móviles, que en este caso para la pastilla de freno y el disco. La formación de finas partículas de óxido entre la pastilla de freno y el disco tuvo que ver con un aumento de temperatura localizado debido a la fricción excesiva en los puntos de contacto locales entre la pastilla y el disco.

En la Figura 12-2 se muestra los resultados de la perfilometría de micro dureza a través de la grieta a diferentes profundidades de la superficie. Los frenos de disco experimentan grandes esfuerzos de compresión en la superficie debido a las cargas ejercidas por la pastilla de freno. Esto da como resultado una deformación plástica y un endurecimiento por trabajo en las capas cercanas a la superficie. En este caso, esto resultó en un aumento en la dureza de aproximadamente 200 VHN en capas profundas dentro del disco de freno a 400 VHN en capas cercanas a la superficie.



**Figura 12-2:** Perfilometría de dureza a través de la fisura

Mohammadnejad Ali, Bahrami Abbas, 2019

Las grietas se forman debido al desgaste y las condiciones de carga severas y se propagan perpendicularmente a la dirección de deslizamiento. Además, se observa desprendimiento de la interfaz grafito-matriz en la superficie de fractura del disco. El desprendimiento del grafito crea rugosidad e irregularidades en la superficie, que a su vez aumentan el coeficiente de fricción.

Las grietas internas en algunas áreas se rellenan con partículas esféricas finas y en forma de astillas. Estas partículas externas dentro de las grietas se caracterizan por ser partículas de óxido por naturaleza.

Se identifican mecanismos de desgaste tanto abrasivos como adhesivos en muestras de clavija sobre disco.

#### **2.5.4. Un estudio de los mecanismos de desgaste de las pastillas de freno de disco y zapata**

En el presente trabajo se presenta un estudio y descripción de los mecanismos de desgaste implicados en pastillas y zapatas. Estos fueron sometidos a un servicio real, aproximadamente 8 meses, en una ciudad que es extremadamente cálida lo que lleva a provocar un proceso de desgaste más rápido.

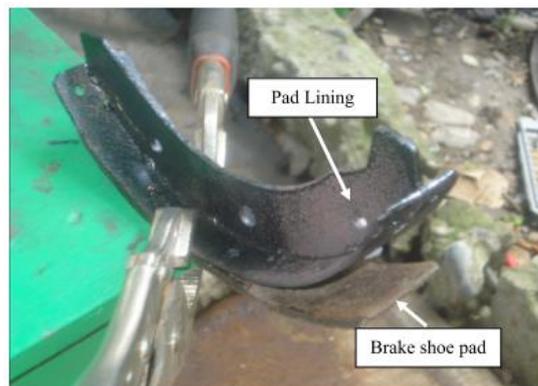
##### **2.5.4.1. Procedimiento experimental**

La caracterización tribológica se realizó en las pastillas de disco (9 cm de largo y 4 cm de ancho) y zapata de freno (12 cm de largo y 4 cm de ancho).

En primer lugar, se extrajeron pequeñas muestras de almohadillas desgastadas (1cm<sup>2</sup>) de

diferentes zonas para realizar un análisis químico y comparar los resultados. Las micrografías de las superficies dañadas se obtuvieron utilizando un microscopio electrónico de barrido (SEM) equipado con un espectrómetro de rayos X de energía dispersiva (EDS). Además, los perfiles de rugosidad de ambas pastillas de freno, antes y después del servicio real, se obtuvieron utilizando un AFM (Microscope diMultimode V, Veeco, Controller diNano-scope V).

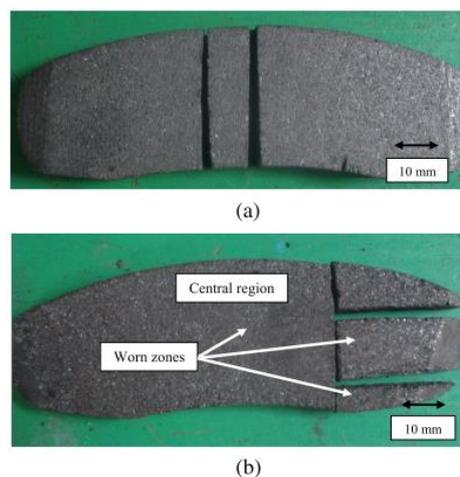
Con respecto a las almohadillas para zapatas, se utilizó un soplete para calentar la almohadilla con cuidado y la retiró, por completo, como se ve en la Figura.13-2.



**Figura 13-2:** Extracción de la almohadilla de la zapata

Fuente: Laguna J., Juárez G, 2015

Las Fig. 14-2 muestran las muestras de las almohadillas de disco desgastadas y sin usar después del servicio real, durante aproximadamente 8 meses. La almohadilla de disco presentó mayor daño por desgaste en un lado por las altas tensiones de contacto con el disco de acero

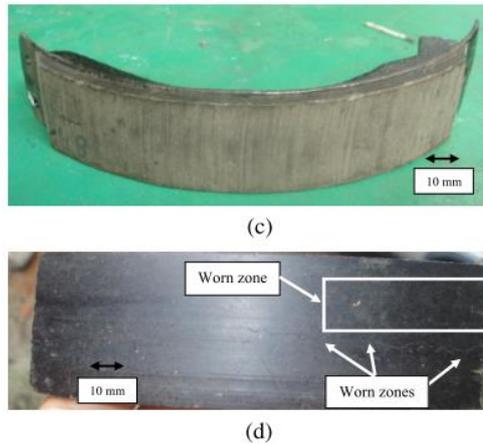


**Figura 14-2:** (a) Pastillas sin uso y (b) con 8 meses de uso

Fuente: Laguna J., Juárez G, 2015

Por otro lado, la Figura 15-2, exhibe las superficies de las almohadillas de zapatos desgastadas y

sin usar. El daño en este caso particular fue causado por el contacto con el tambor.

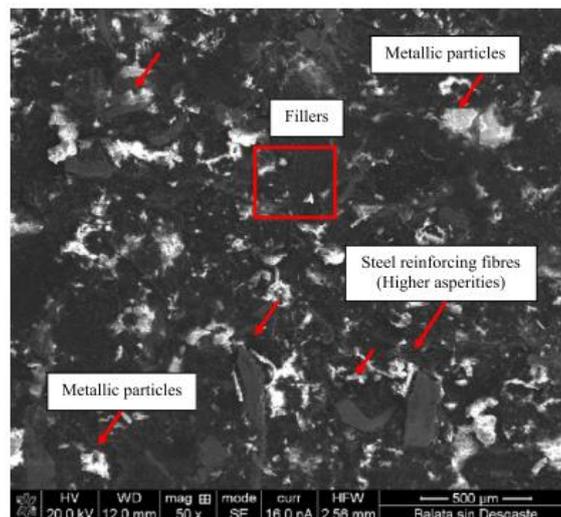


**Figura 15-2:** (a) Almohadilla para zapatas sin usar y (d) desgastada

Fuente: Laguna J., Juárez G, 2015

#### 2.5.4.2. Resultados de los mecanismos de desgaste de las pastillas de freno de disco y zapata

La Figura 16-2 muestra imágenes SEM de la superficie no desgastada de la almohadilla del disco. Aquí, se observa una superficie oscura en el fondo, que podría ser una matriz de resina utilizada como aglutinante para contener los otros componentes y fibras de refuerzo de acero, caracterizadas por un color gris (flechas rojas).



**Figura 16-2:** Imagen SEM de la superficie sin usar de la almohadilla del disco

Fuente: Laguna J., Juárez G, 2015

En este caso particular, se concluyó que las virutas o fibras metálicas correspondían al acero debido al contenido de Fe observado en el análisis de EDS en la Tabla 10-2.

**Tabla 10-2:** Análisis químico en diferentes zonas

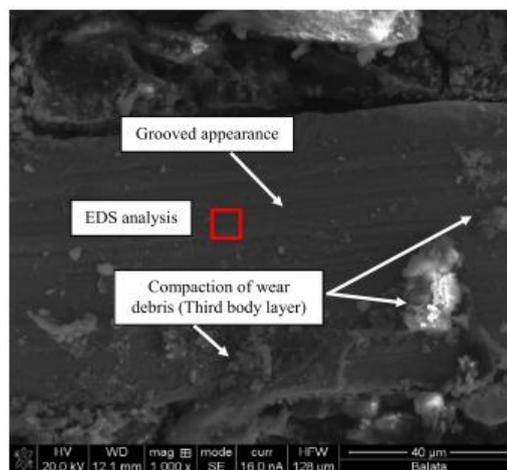
Elemento	Almohadilla de disco sin usar (peso %)	Análisis general (Fig. 3-17) (peso %)	Partícula dura (Fig.5c) (peso %)
Carbono (C)	0.67	0.20	0.19
Oxígeno (O)	26.5	66.6	67.44
Magnesio (Mg)	2.12	1.61	-
Aluminio (Al)	0.83	-	1.13
Silicio (Si)	1.52	-	2.02
Sulfuro (S)	0.1	0.5	-
Calcio (Ca)	0.57	-	0.14
Hierro (Fe)	0.26	10.45	7.89
Bario (Ba)	-	0.34	-
Manganeso (Mg)	-	0.13	-
Cloruro (Cl)	-	-	0.39
Potasio (K)	-	-	0.19

Fuente: Laguna J., Juárez G, 2015

Realizado por: Aguirre César, 2021

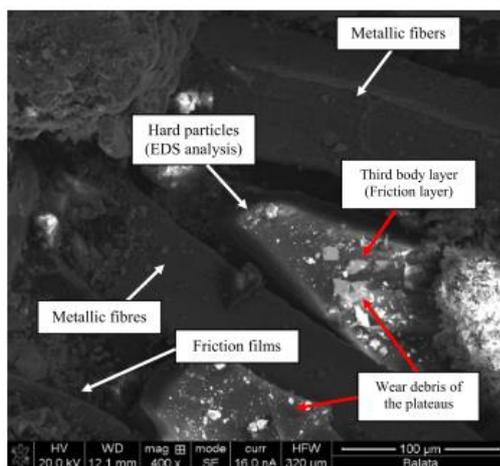
Los restos de desgaste claramente sufrieron un proceso de compactación para formar una capa de tercer cuerpo, que se conoce como capa de fricción. La capa de fricción es importante porque mantiene un coeficiente de fricción estable y constante entre la pastilla de freno y disco de acero a diferentes temperaturas siempre que no se retire la película de fricción.

En la región desgastada aparece nuevos elementos como el sulfato de bario, un relleno comúnmente utilizado en las pastillas de disco para impartir estabilidad térmica al material de fricción del freno. Tiene un punto de fusión de 1350 ° C



**Figura 17-2:** Daños por desgaste de la almohadilla del disco

Fuente: Laguna J., Juárez G, 2015

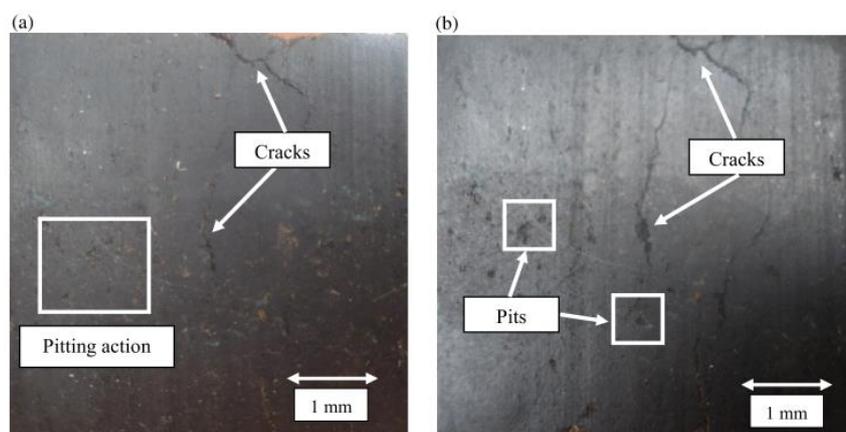


**Figura 18-2:** Daños por desgaste de la almohadilla del disco en diferente zona

Fuente: Laguna J., Juárez G, 2015

En relación al daño por desgaste observado en la zapata, los principales mecanismos de desgaste identificados fueron grandes grietas en las superficies causadas por daños por fatiga debido a los repetidos impactos con el tambor durante el frenado.

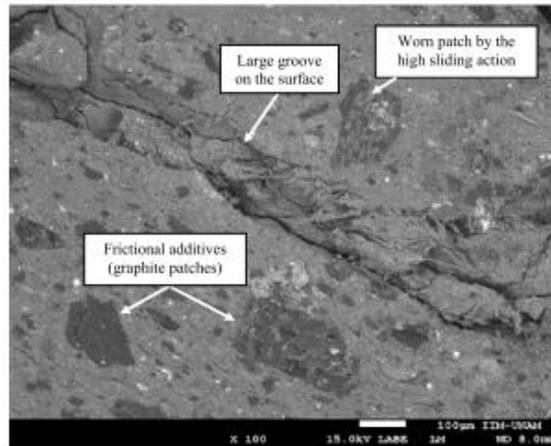
Además, una acción de picadura severa y algunos rasguños y hendiduras irregulares, similares a las que se observan en el deslizamiento y el desgaste abrasivo de tres cuerpos, claramente identificadas en las superficies, como se muestra en la Fig. 19-2.



**Figura 19-3:** Daños por desgaste en la zapata

Fuente: Laguna J., Juárez G, 2015

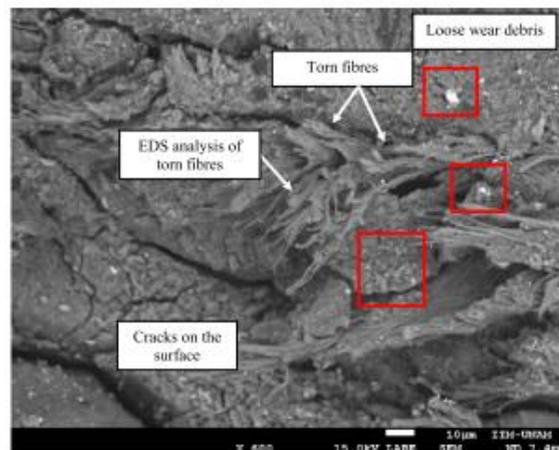
Las manchas oscuras podrían ser zonas de grafito debido al contenido de carbono (C) encontrado en el análisis EDS, que se utiliza como lubricante en las pastillas de freno para asegurar un coeficiente de fricción estable. Figura 20-2.



**Figura 20-2:** Grietas y surcos en la superficie en zapata desgasta

**Fuente:** Laguna J., Juárez G, 2015

En la figura 21-2, elementos como oxígeno (O) 64.01%, magnesio (Mg) 17.52%, silicio (Si) 13.65% y molibdeno (Mo) 4.82%, se encontraron en las fibras rasgadas.

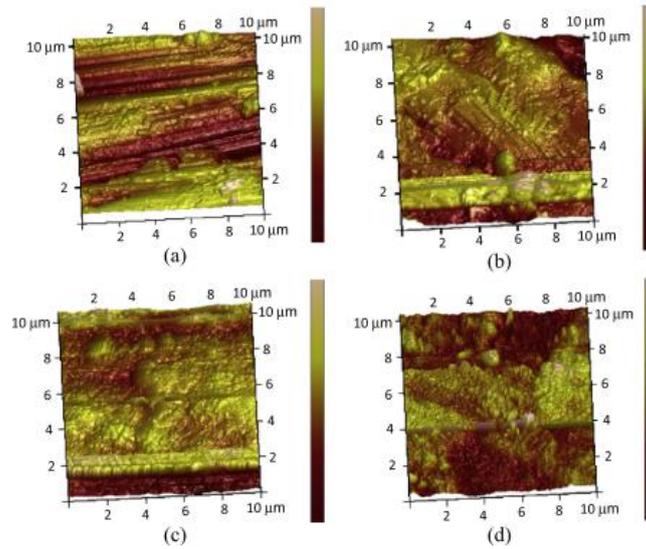


**Figura 21-2:** Grietas y surcos en la superficie en zapata desgasta en diferentes zonas

**Fuente:** Laguna J., Juárez G, 2015

Los perfiles 3D obtenidos mediante AFM del disco y las pastillas de la zapata de freno presentes en las Figuras 22-2 y 23-2, respectivamente.

En relación con los resultados de rugosidad de la almohadilla del zapato, es posible observar la superficie de la pastilla sin usar (Fig. 22-2a) con un valor medio de 56,8 nm (después de 5 mediciones) de diferentes zonas. La rugosidad en las zonas dañadas exhibe la acción de desgarro de las fibras debido a la acción de impacto con el tambor y las altas acciones de deslizamiento y abrasión.

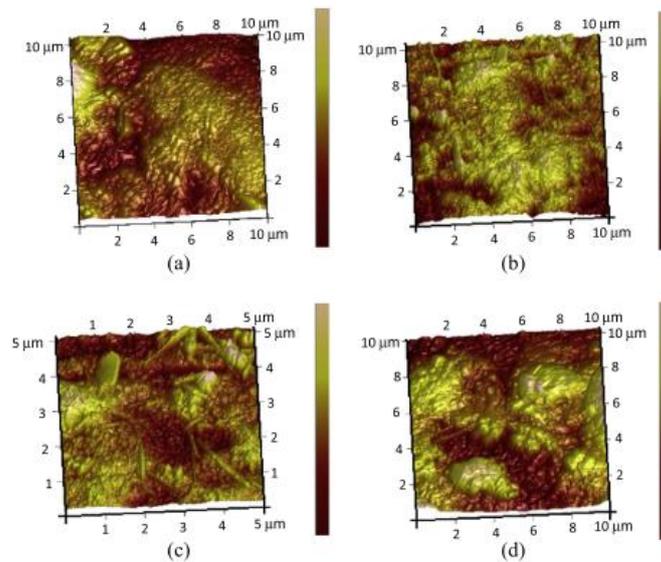


**Figura 22-2:** Perfiles 3D AFM de pastillas de disco

Fuente: Laguna J., Juárez G, 2015

(a) pastilla de disco sin usar, (b – d) almohadilla de disco desgastada

En relación con los resultados de rugosidad de la almohadilla del zapato, es posible observar la superficie de la almohadilla sin usar (Fig. 23-2a) con un valor medio de 56,8 nm (después de 5 mediciones) de diferentes zonas. La rugosidad en las zonas dañadas exhibe la acción de desgarro de las fibras debido a la acción de impacto con el tambor y las altas acciones de deslizamiento y abrasión. Esto concuerda bien con los mecanismos de desgaste observados en las imágenes SEM de la Fig. 21-2.



**Figura 23-2:** Perfiles 3D AFM de zapata de freno

Fuente: Laguna J., Juárez G, 2015

(a) zapata de freno sin usar, (b – d) zapata desgastada.

El análisis AFM presentó perfiles 3D de las variaciones de rugosidad de las superficies del disco y la zapata, antes y después del servicio real.

Los mecanismos de desgaste identificados en las pastillas de disco fueron el deslizamiento y el desgaste por abrasión de tres cuerpos, que se caracterizó por líneas paralelas que descienden en la dirección de deslizamiento (aparición estriada) por la alta acción de contacto con el disco de acero.

En relación al daño por desgaste observado en las zapatas, el mecanismo dominante fue el agrietamiento por fatiga en las superficies, que podría ser causado por la acción de alto impacto de las zapatas contra los tambores, durante el frenado.

#### **2.5.5. *Análisis micro estructural y rendimiento de desgaste del compuesto de SiC reforzado con fibra de carbono para pastillas de freno***

El compuesto de carburo de silicio reforzado con fibra de carbono (C / C-SiC) se usa ampliamente como material de fricción debido a su buen rendimiento, aunque es más caro que los materiales metálicos. El compuesto ligero de C / C-SiC es un candidato ideal para la reducción de peso de las piezas por fricción.

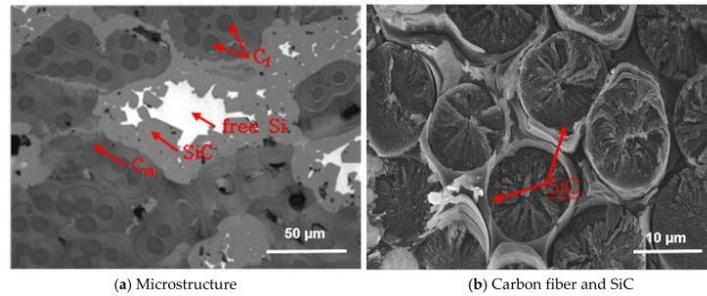
En este estudio, se evaluó el comportamiento de fricción y desgaste del compuesto C / C-SiC utilizando un comprobador de fricción de bola sobre disco en condiciones de deslizamiento recíproco seco a diferentes temperaturas de 25, 100 y 200 °C.

##### **2.5.5.1. *Preparación de la muestra***

Las probetas con dimensiones de 10 x 10 x 3 mm<sup>3</sup> se cortaron a partir de un compuesto C / C-SiC. Para producir los compuestos C / C-SiC, se cortaron fibras de carbono recubiertas con resina fenólica y se mezclaron con polvo de resina fenólica.

Se produjo una preforma formando en caliente la mezcla a 170 °C durante 30 min bajo presión. Se encontró que la densidad medida de las preformas era 1,7 g / cm<sup>3</sup>. Las preformas se pirolizaron en un ambiente de gas inerte mediante una velocidad de temperatura de calentamiento de 10 °C / min hasta 1000 °C. Los ingredientes volátiles de la resina fenólica comenzaron a evaporarse a unos 200 °C.

El tratamiento térmico final del compuesto se realizó a 2000 °C. Finalmente, el compuesto C / C se infiltró con Si fundido a 1550 °C. La fracción de volumen de fibra de SiC en el compuesto C / C-SiC fue de aproximadamente 31%, como se muestra en la Figura 24-2.



**Figura 24-2:** (a) Microestructura de C / C-SiC y (b) Fibra de carbono y SiC

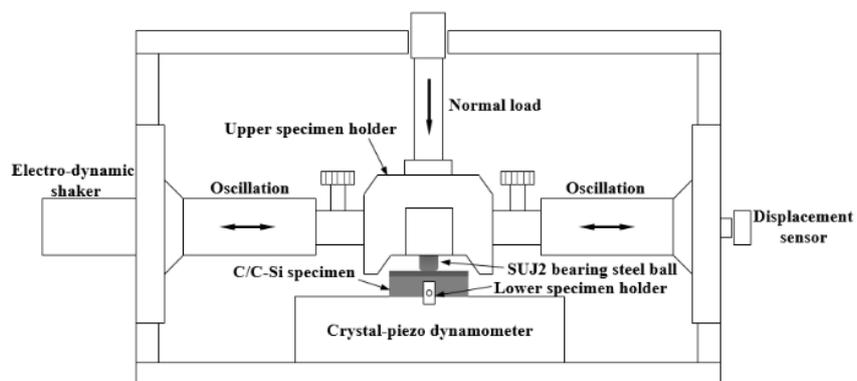
**Fuente:** Goo Byeong-Choon, Cho In-Sik, 2017

*Nota: Cf es la fibra C, Cm es la matriz.*

La densidad del compuesto C / C-SiC fue de aproximadamente 2,2 g / cm<sup>3</sup>. El módulo elástico y la resistencia a la tracción de las probetas fueron de 15 GPa y 60 MPa, respectivamente. Para la caracterización micro-estructural, las muestras se pulieron utilizando una suspensión de alúmina hasta un tamaño de partícula de 1 μm.

#### 2.5.5.2. Pruebas de fricción y desgaste

Las pruebas de fricción y desgaste de las probetas se llevaron a cabo utilizando un tribómetro de bola sobre disco (Optimol SRV4), en condiciones secas a diferentes temperaturas de 25, 100 y 200 °C. La figura 25-2 muestra un diagrama esquemático del tribómetro.



**Figura 25-2:** Diagrama esquemático del tribómetro de bola sobre disco

**Fuente:** Goo Byeong-Choon, Cho In-Sik, 2017

Se encontró que la presión hertziana calculada y el diámetro del área de contacto circular estaban en el rango de 56–451 MPa y 0.230–0.654 mm, respectivamente. La muestra del disco inferior se fijó, mientras que la bola superior oscilaba mediante un agitador electrodinámico. Se utilizó un acero para cojinetes SAE52100 similar a los discos de freno como superficie de contacto con un diámetro de 10 mm.

Todas las pruebas de fricción y desgaste se realizaron tres veces. Antes de las pruebas tribológicas, las muestras se limpiaron en agua desionizada durante 10 minutos para eliminar el polvo y la contaminación sólida.

La Tabla 11-2 presenta las condiciones de las pruebas de fricción y desgaste.

**Tabla 11-2:** Condiciones de prueba de fricción y desgaste

Carga normal (N)	Frecuencia (Hz)	Carrera (mm)	Tiempo deslizante (min)	Temperatura (°C)	RH "Humedad relativa" (%)
50	10	1	30	25, 100, 200	60

Fuente: Goo Byeong-Choon, Cho In-Sik, 2017

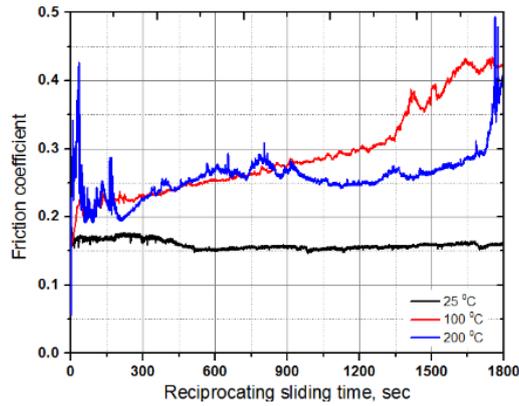
Realizado por: Aguirre César, 2021

### 2.5.5.3. Resultados del análisis micro estructural y rendimiento de desgaste del SiC

La Figura 26-2 muestra la variación en los coeficientes de fricción para la muestra a temperaturas de 25, 100 y 200 °C. A una temperatura de 25 °C, se observa un comportamiento de fricción muy estable con un valor de 0,16-0,17.

Sin embargo, el coeficiente de fricción aumentó gradualmente con la distancia de deslizamiento y alcanzó aproximadamente 0,42 después de un tiempo de deslizamiento de 30 min a una temperatura de 100 °C. Curiosamente, el coeficiente de fricción fue muy alto en la etapa inicial de la prueba, y luego el coeficiente de fricción disminuyó drásticamente y aumentó gradualmente a una temperatura de 200 °C.

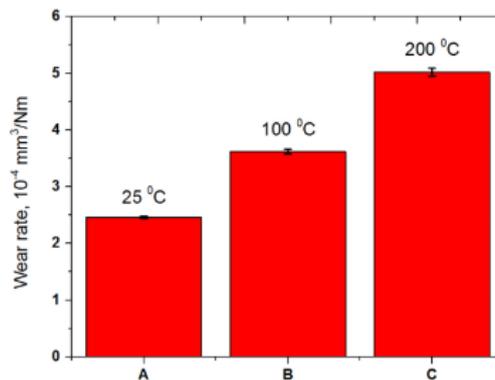
Después de un tiempo de deslizamiento de aproximadamente 15 min, el coeficiente de fricción se estabilizó y disminuyó un poco, y luego comienza a aumentar y alcanzó un valor de coeficiente de fricción muy alto de aproximadamente 0.48-0.50 al final de la prueba.



**Figura 26-2:** Variación del coeficiente de fricción respecto a temperaturas

Fuente: Goo Byeong-Choon, Cho In-Sik, 2017

La Figura 27-2 muestra las tasas de desgaste a temperaturas de 25, 100 y 200 °C. La tasa de desgaste aumentó con el aumento de la temperatura.



**Figura 27-2:** Desgaste del compuesto C / C-SiC deslizado contra acero AISI52100

Fuente: Goo Byeong-Choon, Cho In-Sik, 2017

Se encontró que la rugosidad superficial promedio de la muestra de C / C-SiC antes de las pruebas de fricción y desgaste era de 2,35  $\mu\text{m}$ , mientras que la dureza de la superficie era de 156 HV. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que los valores de rugosidad de la superficie dependen en gran medida de la ubicación del material compuesto debido a la presencia de poros en la superficie.

El coeficiente de fricción de la muestra de C / C-SiC a 25 °C fue muy estable con un valor de aproximadamente 0,16, mientras que los coeficientes de fricción a 100 y 200 °C fueron inestables.

El coeficiente de fricción aumenta con una temperatura en aumento en el período inicial de la prueba, pero después de algunos deslizamientos, el coeficiente de fricción a 200 °C fue menor que a 100 °C.

La resistencia al desgaste disminuyó al aumentar la temperatura. Se reveló que el mecanismo de desgaste de C / C-SiC contra el acero SAE52100 era de modo abrasivo. Se cree que el compuesto C / C-SiC desarrollado puede ser un buen candidato para una pastilla de freno ecológica.

## **2.6. Evaluación de la calidad de las referencias de los artículos**

### **2.6.1. *Microestructura y propiedades de los materiales de freno de carbono / carburo de silicio perforados en 3D***

Para el estudio de la investigación “El rendimiento de frenado y el mecanismo de desgaste de pares de frenos completamente de carbono / cerámicos se utilizó las preformas de carbono 3D”.

Los materiales de freno de carbono / carburo de silicio se prepararon mediante infiltración de vapor químico (CVI) combinada con infiltración de masa fundida líquida (LMI). La preforma de fibra de carbono se fabricó con el método de punción tridimensional.

Se investigaron las propiedades microestructura, mecánicas, termofísicas y de fricción de los compuestos C / SiC. Los resultados indicaron que los materiales compuestos estaban compuestos por 65 % en peso de C, 27 % en peso de SiC y 8 % en peso de Si. La densidad y la porosidad fueron  $2,1\text{ g cm}^{-3}$  y 4,4%, respectivamente.

Los materiales de freno C / SiC exhibieron una excelente tenacidad. El coeficiente de fricción dinámica y el coeficiente de fricción estática promedio de los materiales fueron de aproximadamente 0,34 y 0,41, respectivamente. El coeficiente de fricción fue estable. La relación de desvanecimiento del coeficiente de fricción en condiciones de humedad fue de aproximadamente 2,9%. La tasa de desgaste lineal fue inferior a  $1,9\ \mu\text{m}$ . Estos resultados muestran que los compuestos C / SiC tienen excelentes propiedades para su uso como materiales de freno para automóviles. (Shangwu Fan, Litong Zhang, Yongdong Xu, p.1, 2007)

### **2.6.2. *Medición de la temperatura de flash durante el proceso de fricción seca a alta velocidad de deslizamiento***

Para la realización de artículo científico “Investigación sobre el rendimiento de frenado y el mecanismo de desgaste de pares de frenos completamente de carbono/cerámicos” se toma en cuenta aspectos como la temperatura para el coeficiente de fricción de esta referencia el cuál presenta un método experimental para medir las temperaturas de flash de superficies deslizantes.

Las altas velocidades de deslizamiento se alcanzan mediante el uso de una configuración balística equipada con una cámara de alta velocidad. El campo de temperatura en la superficie de fricción se registró durante el proceso. Los ensayos se realizaron en condiciones de deslizamiento en seco utilizando un material idéntico para los cuerpos de fricción, que son de acero de dureza media.

Los experimentos mostraron que la distribución de temperatura generada por el calentamiento por fricción está formada por pequeños puntos calientes que corresponden a la fricción de las asperezas ubicadas en la superficie de deslizamiento durante un tiempo muy corto.

Deducido de las observaciones, las temperaturas máximas de la superficie local pueden exceder aproximadamente 1100 ° C alrededor de un área de menos de 100 µm de diámetro. (G. Sutter y N. Ranc, p.1, 2010)

### **2.6.3. *Integración de discos de freno cerámicos en sistemas de frenos automotrices***

El artículo científico “Investigación sobre el rendimiento de frenado y el mecanismo de desgaste de pares de frenos completamente de carbono/cerámicos” toma como referencia este artículo que trata sobre la integración de discos de freno cerámicos en la industria automovilística en la época de 2001. Los sistemas de frenos cerámicos proporcionan una potencia de frenado excepcional no solo en los vehículos de alto rendimiento sino también en los vehículos comerciales de los distintos fabricantes de equipos originales.

Los discos de freno cerámicos de estos sistemas de freno de se basan en un material compuesto especial reforzado con fibra corta de carbono, que, después de la fabricación, se expone a silicio líquido en un proceso de vacío a alta temperatura a aproximadamente 1700 ° C.

Los resultados de esta reacción es que los discos de freno son significativamente más ligeros, en comparación con los discos de freno convencionales de fundición gris. Estos discos de freno ofrecen una mayor resistencia, una mayor estabilidad térmica y, por lo tanto, un menor desgaste, como una mayor estabilidad a la decoloración. (Renz Ralf, Seifert Gerd y Krenkel Walter, p.1 2012)

### **2.6.4. *Fricción y desgaste de pastillas de freno metálicas sinterizadas en un disco de freno compuesto C / C-SiC***

En el artículo científico “Investigación sobre el rendimiento de frenado y el mecanismo de desgaste de pares de frenos completamente de carbono/cerámicos” se toma esta referencia porque informa sobre las propiedades de fricción y desgaste de los forros de freno metálicos sinterizados

(MMC), que parecen combinar bien con un disco de freno C / C-SiC.

Las características de fricción se examinaron con un dinamómetro en dos sistemas de frenos de autos comerciales diferentes, que diferían en términos de la pinza de freno y las dimensiones del disco.

La influencia de los componentes, como el grafito, y los abrasivos en la matriz metálica en la formación de la capa de fricción se investigó utilizando un microscopio electrónico de barrido (SEM) equipado con espectroscopia de rayos X de dispersión de energía. (EDX).

La adición de SiC aumenta la dureza del revestimiento metálico base en más de un 50%, mientras que su influencia en el coeficiente de fricción medio es menos significativa. La tasa de desgaste de este material de revestimiento es un 30% más alta que la del revestimiento metálico base a pesar de tener mayor dureza. Las muestras que contienen grafito muestran una tasa de desgaste más baja. (Stadler Zmago, Krnel Kristoffer y Kosmač Tomaz, p.1, 2008)

#### **2.6.5. *Evaluación del rendimiento de fricción de los materiales de las pastillas de freno de nuevo diseño***

Para el estudio del artículo “Sistema pastilla-disco de frenado: Mecanismos de desgaste y formación de fragmentos de desgaste” se utiliza esta referencia “Evaluación del rendimiento de fricción de los materiales de las pastillas de freno de nuevo diseño” la cual tiene como objetivo estudiar la diferencia de propiedades tribológicas de materiales de pastillas de freno no comerciales de diseño potencialmente nuevo con y sin amianto a varias velocidades y presiones de contacto nominales.

Los dos materiales fabricados de pastillas de freno de asbesto no comerciales (ABP) y pastillas de freno sin asbesto (NABP) se probaron y se compararon con un material de pastillas de freno comercial seleccionado (CMBP) utilizando una plataforma de prueba tribo de clavija sobre disco en seco con condición de contacto.

Los resultados mostraron que los coeficientes de fricción para todos los materiales eran insensibles al aumento de la velocidad y la presión en NABP mantuvo un rendimiento de fricción estable como material ABP cuando la temperatura de contacto se elevó. Además, NABP demostró tener una mayor resistencia al desgaste en comparación con los materiales ABP y CMBP.

Es más, las micrografías SEM de las superficies de las pastillas de freno mostraron cráteres que se deben a la desintegración de las mesetas. Finalmente, los resultados de la prueba indicaron que

el NABP tiene la característica de frenado potencial de un material de pastilla de freno.(K. Liew, Umar Nirmal, p.1, 2013)

#### **2.6.6. *Compuestos como materiales de fricción: desarrollos recientes en materiales de fricción reforzados con fibra sin amianto***

En el estudio de “Sistema pastilla-disco de frenado: Mecanismos de desgaste y formación de fragmentos de desgaste” se toma en consideración materiales para las pastillas de freno sin amianto, este artículo “Compuestos como materiales de fricción” nos da una revisión sobre otros materiales que se puede utilizar en vez del amianto. Se ha pedido el reemplazo de los materiales de fricción convencionales a base de amianto debido a la prohibición del uso de este.

El artículo científico revela que los polímeros reforzados con fibra son muy prometedores para aplicaciones en vehículos modernos.( Jayashree Bijwe, p.1, 1997)

#### **2.6.7. *Resistencia al desgaste de hierros fundidos utilizados en rotores de discos de freno***

Se habla sobre fundición gris en el artículo científico “Falla inducida por desgaste de frenos de disco automotrices” y en esta referencia se estudia la resistencia al desgaste de tres tipos diferentes de fundición gris (fundición gris grado 250, fundición gris con alto contenido de carbono y fundición gris aleada con titanio), utilizados en los discos de freno, y se comparó con los resultados obtenidos con una fundición compacta de grafito (CGI).

Las pruebas de desgaste se llevaron a cabo en una máquina de prueba de desgaste de pasador sobre disco, el pasador se fabricó con material de fricción que se usa generalmente en las pastillas de freno de camiones ligeros. Los discos giratorios (500 rpm) se sometieron a presiones cíclicas de 0.7, 2 y 4 MPa y se enfriaron a la fuerza.

El desgaste se midió pesando discos y pastillas antes y después de la prueba. Las temperaturas de funcionamiento y las fuerzas de fricción también se controlaron durante cada prueba.

Los resultados mostraron que el hierro de grafito compacto alcanzó temperaturas máximas y fuerzas de fricción más altas, así como mayores pérdidas de masa que los tres hierros grises a cualquier presión aplicada.(Cueva G., Sinatora A., Guesser W., Tschiptschin A., p.1, 2003)

### **2.6.8. *Análisis de los mecanismos de iniciación y propagación de fisuras por fatiga en discos de freno***

En este artículo “Falla inducida por desgaste de frenos de disco automotrices” se enuncia temas sobre fisuras y esta referencia investiga sobre un número significativo de discos de freno fabricados con acero forjado que mostraron grietas térmicas durante el trabajo.

Estas son de tres tipos de grietas en la superficie de fricción; a saber, el crujido, la grieta radial y la grieta circunferencial. Las macro morfologías de la superficie de fricción indican que las grietas aparecieron en el interior y los bordes de los puntos calientes. Los métodos de crecimiento de grietas incluyen la propagación de grietas únicas y la conectividad de grietas múltiples.

Se realizó un análisis de elementos finitos (FEA) para determinar la distribución de la temperatura y la tensión en el disco de freno, así como para estimar la distribución de la tensión durante el frenado.

Los resultados de la simulación indican una tensión de tracción circunferencial residual máxima es 100 MPa después de una frenada de emergencia de 150 km / h. Además, solo existe la tensión de compresión circunferencial en una sección que está a cierta distancia del exterior de la superficie de fricción, y la distancia depende de las condiciones de frenado.

Por lo tanto, sin tener en cuenta la reducción del espesor de la superficie de fricción debido al desgaste, se puede concluir que cuando las grietas corren a lo largo de la dirección del espesor hasta la distancia especificada, dejarán de correr en esta dirección y comenzarán a propagarse principalmente en la dirección del radio. (Yang Zhiyong, Han Jianmin, LI Weijing, p.1, 2013)

### **2.6.9. *Texturizado superficial con láser de fundición gris para mejorar el comportamiento tribológico***

Para reducir el desgaste y presencia de fisuras “Falla inducida por desgaste de frenos de disco automotrices” se toma en consideración esta referencia con un proceso de texturizado de la superficie con láser implica la creación de micro características, por ejemplo, pequeños hoyuelos, generalmente distribuidos en un patrón determinado, que cubren solo una fracción de la superficie del material que se está tratando.

El proceso ofrece varias ventajas para las aplicaciones tribológicas, incluida la capacidad de carga mejorada, la resistencia al desgaste, la vida útil de la lubricación y el coeficiente de fricción

reducido.

Las superficies micro texturizadas se produjeron en hierro fundido gris utilizando una fuente de láser de diferentes milisegundos (0,5 ms), nanosegundos (40 ns) y femtosegundos (120 fs) con la profundidad del hoyuelo entre 3 y 15  $\mu\text{m}$ .

El coeficiente de fricción para la superficie no texturizada fue  $\sim 0.55$ , milisegundos texturizados con láser  $\sim 0.31$ , nanosegundos texturizados con láser  $\sim 0.02$  y femtosegundos con láser  $\sim 0.01$ , bajo una fuerza normal de 50 N y una velocidad de deslizamiento de 63 mm / s.

En condiciones de funcionamiento similares, el texturizado fue observado para reducir el coeficiente de fricción y el desgaste, con respecto a la superficie sin textura. Se ha demostrado que se pueden obtener coeficientes de fricción más bajos del orden de 0,01. utilizando texturizado de superficie con láser de femtosegundos.

Las muestras de superficie texturizada mostraron una reducción de casi el 98% en el coeficiente de fricción en comparación con las muestras de superficie sin textura. (Bathe Ravi, Sai Krishna, Nikumb K., p.1, 2014)

#### **2.6.10. *Formación de la tercera capa en pastillas de freno y rotores***

Cuando la pastilla de freno está en contacto con otro cuerpo da lugar la generación de una tercera capa y esto se toma en consideración en el artículo “Un estudio de los mecanismos de desgaste de las pastillas de freno de disco y zapata”. La superficie de una pastilla de freno se investiga después de un período de rodaje durante el cual se había desarrollado un coeficiente de fricción estable.

La técnica de haz de iones enfocados (FIB) se utilizó para revelar películas superficiales inducidas tribológicamente y para la preparación transversal de capas superficiales.

Las áreas de contacto microscópicas de la almohadilla mostraron un contraste brillante en la microscopía iónica de barrido (SIM). Esto se atribuye a una deformación plástica severa que finalmente condujo a una microestructura nano cristalina.

Las partículas metálicas de la almohadilla, las denominadas áreas de contacto primarias, se cubrieron en su mayoría con una capa de óxido suave de menos de 1  $\mu\text{m}$  de espesor. Por encima de esta capa, una fina (100 nm) a menudo se observó una película parcialmente amorfa. La

película no solo se restringió a las partículas metálicas, sino que también se extendió por regiones adyacentes, lo que sugiere que se habían formado mesetas secundarias.

La composición de las películas de fricción en la pastilla es determinada principalmente por lubricantes sólidos que forman parte de la formulación de la pastilla. (Österle Werner y Urban Ingrid, p.1, 2006)

#### **2.6.11. *Mecanismo de formación y desgaste de tribo-óxidos y régimen de desgaste oxidativo del acero***

Se observa mecanismos de desgaste en el artículo “Un estudio de los mecanismos de desgaste de las pastillas de freno de disco y zapata” por ende en la referencia “Mecanismo de formación y desgaste de tribo-óxidos y régimen de desgaste oxidativo del acero” es de vital importancia saber el mecanismo de desgaste de los tribo-óxidos en las superficies de contacto deslizantes de algunos aceros.

Se empleó una configuración de pasador sobre disco para estudiar la formación y el mecanismo de desgaste de los tribo-óxidos. La velocidad de deslizamiento se estableció en valores de 0,6 a 8 m / s, la pérdida por desgaste se debió principalmente a la extrusión plástica del material del pasador y el desgaste se volvió severo.

Entre estos dos extremos, el mecanismo de desgaste cayó en el régimen de desgaste oxidativo. En el cual, los tribo-óxidos se formaron principalmente en las zonas plásticas justo debajo de las uniones adhesivas.

Se encontraron tres mecanismos de desgaste a partir de los resultados micrográficos. Cuando los pares de fricción se sometieron a una pequeña presión nominal y velocidad de deslizamiento, la pérdida por desgaste se debió principalmente a mecanismos adhesivos y abrasivos.

En el régimen de desgaste oxidativo, es sensato considerar que las zonas de plástico debajo de las uniones adhesivas son la principal fuente de calor por fricción. Estas zonas son la primera prioridad para la oxidación. Una vez que se formó un óxido, el crecimiento de su tamaño fue insignificante, esto quiere decir que no afectó estructuralmente al acero y por lo tanto no va a existir una variación de formación y desgaste de tribo-óxidos y régimen de desgaste oxidativo. (So H., Yu D. y Chuang C., p.1, 2002)

### **2.6.12. Rendimiento de fricción de los frenos compuestos cerámicos de carbono / carburo de silicio en entornos de aire ambiente y agua pulverizada**

El artículo científico “Análisis microestructural y rendimiento de desgaste del compuesto de SiC reforzado con fibra de carbono para pastillas de freno” nos habla sobre el comportamiento de fricción del compuesto C / C-SiC, y esta referencia tiene buena información sobre lo ya mencionado.

Se examina el rendimiento de la fricción, la estructura de la superficie de fricción y la química de un disco de freno de cerámica de carburo de silicio / carbono probado contra una pastilla orgánica en el aire y en un ambiente de rociado de agua. Se consigue un coeficiente de fricción medio de 0,52 y 0,4 para una parada de frenado después de asentar en aire para un disco compuesto que comprende 53,1% y 17,7% de SiC / Si, respectivamente.

Se identifica que las regiones 100% SiC / Si y ~ 50% C f / C contribuyen a la medición de la fricción. Probados con agua pulverizada, ambos frenos muestran una caída sustancial del coeficiente de fricción a un nivel  $<0,1$ . Se proporcionan pruebas de la existencia de fricción hidrodinámica.

La eliminación de materiales de transferencia por fricción, el pulido de la región de SiC y la presión de contacto real más baja refuerzan el proceso hidrodinámico que puede experimentar un freno de material compuesto cerámico.

Los materiales de transferencia por fricción no eran sostenibles con agua rociada. (Bian Guangyu y Wu Houzheng, p.1, 2015)

### **2.6.13. Mecanismos de desgaste de los materiales de freno C / SiC**

Para el estudio del artículo científico “Análisis microestructural y rendimiento de desgaste del compuesto de SiC reforzado con fibra de carbono para pastillas de freno” incluye información sobre el C / SiC que esta referencia tiene datos interesantes.

Los materiales de freno C / SiC se fabricaron mediante infiltración de vapor químico combinada con infiltración de líquido fundido. Se investigaron los mecanismos de desgaste de los materiales de freno C / SiC.

Los principales mecanismos de desgaste fueron la abrasión del grano, la abrasión por oxidación,

el desgaste por fatiga y el desgaste adhesivo. Estos mecanismos de desgaste siempre ocurrieron simultáneamente y mostraron efectos de mejora mutua entre ellos. La abrasión del grano fue principalmente el resultado de la acción del grano de SiC duro.

El desgaste del adhesivo puede causar altas tasas de desgaste y un gran coeficiente de fricción inestable. El Si fue el factor significativo en el desgaste del adhesivo, por lo que el Si en los materiales de freno C / SiC debe eliminarse. (Fan Shangwu, Zhang Litong, Cheng Laifei, p.1, 2011)

#### **2.6.14. *Preparación y comportamiento de fricción de compuestos de matriz de carburo de silicio reforzados con fibra de carbono***

Se habló sobre carburo de silicio reforzados con fibra de carbono en el artículo “Análisis microestructural y rendimiento de desgaste del compuesto de SiC reforzado con fibra de carbono para pastillas de freno” y esta es la referencia que contiene información sobre dicho tema que ha recibido una atención considerable debido a su comportamiento de fricción superior.

Los compuestos de carbono / carburo de silicio se fabricaron mediante infiltración de vapor químico. Se investigaron la microestructura, las propiedades mecánicas y el comportamiento de fricción.

La preforma de fibra de carbono se fabricó con el método de punción tridimensional, y los compuestos de carbono / carburo de silicio (C / SiC) infiltrados exhibieron una excelente resistencia al cizallamiento.

El comportamiento de fricción y la estabilidad de fricción se mejoran significativamente al aumentar tanto la densidad como el contenido de carbono de los compuestos.

Si la densidad del material compuesto es  $2,3 \text{ g cm}^{-3}$ , el coeficiente de fricción medido es 0,23, el coeficiente de estabilidad a la fricción es 0,43 y la tasa de desgaste del revestimiento es inferior a  $9,3 \text{ } \mu\text{m} / \text{ciclo}$ .

El coeficiente de fricción y la estabilidad de fricción de los compuestos C / SiC mejoraron significativamente al aumentar el contenido de carbono y la densidad del material. (Xu Yongdong, Zhang Yani, Cheng Laifei, p.1, 2007)

## 2.7. Comparativa de artículos científicos

**Tabla 12-2:** Comparativa de artículos científicos

Nombre de artículo científico	Materiales y equipos	Métodos	Coefficiente de fricción	Mecanismo de desgaste
Investigación sobre el rendimiento de frenado y el mecanismo de desgaste de pares de frenos completamente de carbono/cerámicos	Pastillas y discos carbono / cerámicos, fibras de carbono a base de poliacrilonitrilo, preformas de carbono 3D, compuestos de C / C, polvos de aleación de silicio puro o FeSi75, dinamómetro de escala de laboratorio	Proceso de infiltración química de vapor (CVI), pruebas de fricción y desgaste según SAE-J2522	En el par de frenado SD-SP se encuentra un coeficiente de fricción alto, mientras que en el par de frenado SD-FP se encuentra un coeficiente de frenado bajo.	Desgaste abrasivo
Sistema pastilla-disco de frenado: Mecanismos de desgaste y formación de fragmentos de desgaste	Equipo pin-on-disc (clavija – sobre – disco), pastilla sin amianto, espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF), yeso gris, discos de hierro, espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDXS)	Pruebas de deslizamiento en seco, pruebas de desgaste, microscopio electrónico de barrido (SEM)	Coefficiente de fricción alto	Desgaste por tribooxidación.
Falla inducida por desgaste de frenos de disco automotrices	Freno de disco averiado, microscopios ópticos, microscopio electrónico de barrido (SEM), espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (EDS), perfilómetro láser	Mecanizado por electro descarga (EDM), prueba de micro dureza Vickers, prueba de desgaste pin-on-disc, pruebas de desgaste	Coefficiente de fricción estable	Desgaste abrasivo en bordes afilados, desgaste abrasivos como adhesivos en muestras de clavija sobre disco.
Un estudio de los mecanismos de desgaste de las pastillas de freno de disco y zapata	Pastillas de disco de freno, zapatas de freno, microscopio electrónico de barrido (SEM), espectrómetro de rayos X de energía dispersiva (EDS), microscopio de fuerza atómica (AFM), soplete.	Caracterización tribológica, Análisis químico en diferentes zonas	Coefficiente de fricción estable	Mecanismos de desgaste son deslizamiento y el desgaste por abrasión de tres cuerpos
Análisis microestructural y rendimiento de desgaste del compuesto de SiC	Carburo de silicio reforzado con fibra de carbono (C / C-SiC), espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (EDS), tribómetro de bola sobre disco (Optimol SRV4).	Tratamiento térmico, pruebas de fricción y desgaste	Coefficiente de fricción estable	Desgaste abrasivo

Realizado por: Aguirre César, 2021

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1. Organización de la información

Se realiza una organización de la información mediante gráficas basadas en el impacto de las revistas en las cuales fueron publicados los artículos científicos, características como Factor H (H-Index), indicador SJR, Cuartiles (Quartiles).

Para esta organización de la información se utiliza la página web “Scimago Journal & Country Rank” la cual es un portal que incluye las revistas y los indicadores científicos a partir de la información contenida en la base de datos Scopus desde el año 1996 hasta su última actualización en 2020.

##### 3.1.1. *Factor-H*

Factor-H ó H-Index es un sistema propuesto por Jorge Hirsch, de la Universidad de California, para la medición de la calidad profesional. Representa un indicador para evaluar la producción científica de un investigador.

Permite hacer el balance entre el número de publicaciones y las citas que recibe. Este indicador se aplica a países y revistas.

Para calcular el Factor-H, se ordenan (en orden descendente) las publicaciones por el número de citas recibidas, enumerándolas para identificar el punto en el que el número de orden coincide con el número de citas recibidas por una publicación.

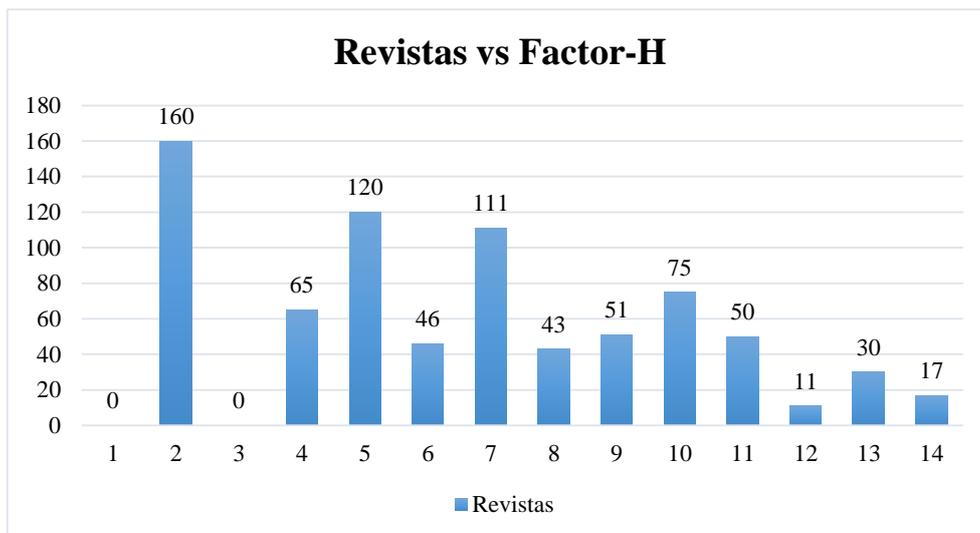
Por ejemplo:

**Factor-H 8** = significa que al menos 8 artículos han recibido 8 citaciones cada uno.

A continuación, se enlista las revistas utilizadas en los artículos científicos en la Tabla 3-1 en este estudio sobre el análisis del mecanismo de desgaste en pastillas de freno de material compuesto en vehículos utilitario.

- |  |   |
|--|---|
| 1. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada | 9. Applied Composite Materials Journal  |
| 2. Wear Journal                                  | 10. Engineering Failure Analysis Journal  |
| 3. Revista Ciencia Digital                       | 11. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology Journal |
| 4. Tribology Transactions                        | 12. Australian Journal of Mechanical Engineering  |
| 5. Tribology International Journal               | 13. Friction Journal  |
| 6. Archives of Civil and Mechanical Engineering  | 14. Tribology – Materials   |
| 7. Materials Journal                             |   |
| 8. Arabian Journal for Science and Engineering   |   |

En el Gráfico 1-3 se muestra una gráfica de la caracterización de todas las revistas utilizadas en el estudio en función del Factor-H.



**Gráfico 1-3:** Revistas vs Factor –H

Realizado por: Aguirre César, 2021

Según el Gráfico 1-3 nos indica que la revista (2) Wear de Países Bajos es la que tiene un Factor-H más elevado de 160 en relación con las revistas utilizadas en este estudio, esta revista se dedica al avance del conocimiento básico y aplicado sobre la naturaleza del desgaste de los materiales. La siguiente revista con un Factor-H de 120 es la (5) Tribology International de Reino Unido, los temas científicos de esta revista incluyen la física o química de tribo-superficies, bio-tribología, ingeniería de superficies y materiales, mecánica de contacto, nano-tribología, lubricantes y lubricación hidrodinámica. En tercer lugar, la revista con un Factor-H de 111 es (7) Materials que

proviene de Suiza, esta revista se encarga de artículos que avanzan en la comprensión profunda de la relación entre la estructura, las propiedades o las funciones de todo tipo de materiales.

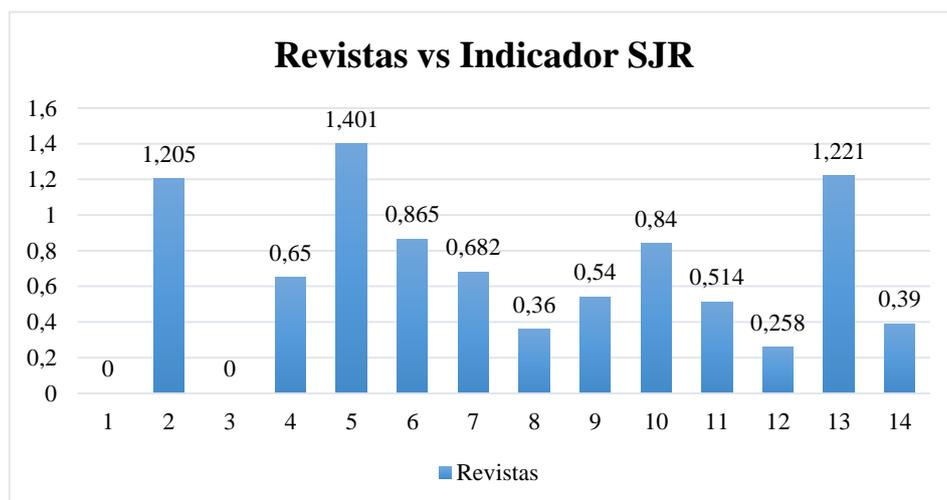
Estas 3 revistas mencionadas anteriormente tienen un Factor-H mayor a 100, son unas revistas con un contenido de calidad de primera en información y de citas según la página web “Scimago Journal & Country Rank”. Por ende, son las mejores revistas encontradas en la organización de la información para este estudio.

### 3.1.2. *Indicador SCImago Journal Rank*

SCImago Journal Rank ó SJR es índice de impacto o un indicador de prestigio independiente del tamaño que clasifica las revistas según su "prestigio medio por artículo". Se basa en la idea de que "no todas las citas son iguales". SJR es una medida de la influencia científica de las revistas que da cuenta tanto del número de citas recibidas por una revista como de la importancia o prestigio de las revistas de donde provienen dichas citas mide la influencia científica del artículo promedio en una revista.

El indicador SJR se realiza sobre el cálculo de las citas recibidas por las revistas en un periodo de 3 años, dando un mayor peso a las citas procedentes de revistas de alto prestigio.

Así como en el caso del Factor-H se realiza una gráfica en donde tenemos las revistas utilizadas para este estudio en relación con el SJR de cada una, estos datos son actualizados al año 2020.



**Gráfico 2-3:** Revistas vs Indicador SJR

Realizado por: Aguirre César, 2021

El Gráfico 2-3 indica que la revista (5) Tribology International de Reino Unido es la que tiene un

mayor índice de SJR de 1,401 para este estudio. Seguido de la revista (13) Friction de China con un SJR de 1,221 es una revista internacional es revisada por pares para la publicación de trabajos de investigación teóricos y experimentales relacionados con la fricción, la lubricación y el desgaste. Finalmente le sigue la revista (2) Wear de Países Bajos con un SJR de 1,205.

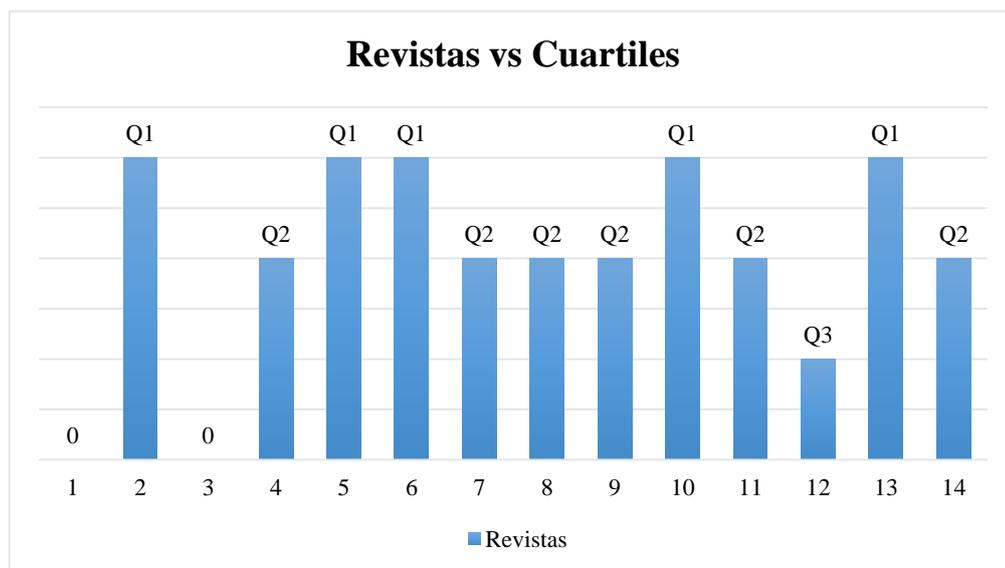
Estas son las 3 revistas con un mayor valor del indicador SJR y por ende los artículos científicos extraídos de estas revistas son de un alto prestigio, la información y las citas también son de alta influencia científica.

### 3.1.3. Cuartiles

El cuartil ó quartil es un indicador que sirve para evaluar la importancia relativa de una revista dentro del total de revistas de su área. Es decir, es una medida de posición de una revista en relación con todas las de su área.

Por ejemplo, si se divide un listado de revistas ordenadas de mayor a menor índice de impacto, entre 4, obtendremos 4 grupos de revistas: cada conjunto es un cuartil. En un listado de 100 revistas, por ejemplo, el primer cuartil son las 25 primeras.

Las revistas con el índice de impacto más alto estarán en el primer cuartil, los cuartiles medios serán el segundo y el tercero y el cuartil más bajo será el cuarto.



**Gráfico 3-3:** Revistas vs Cuartiles

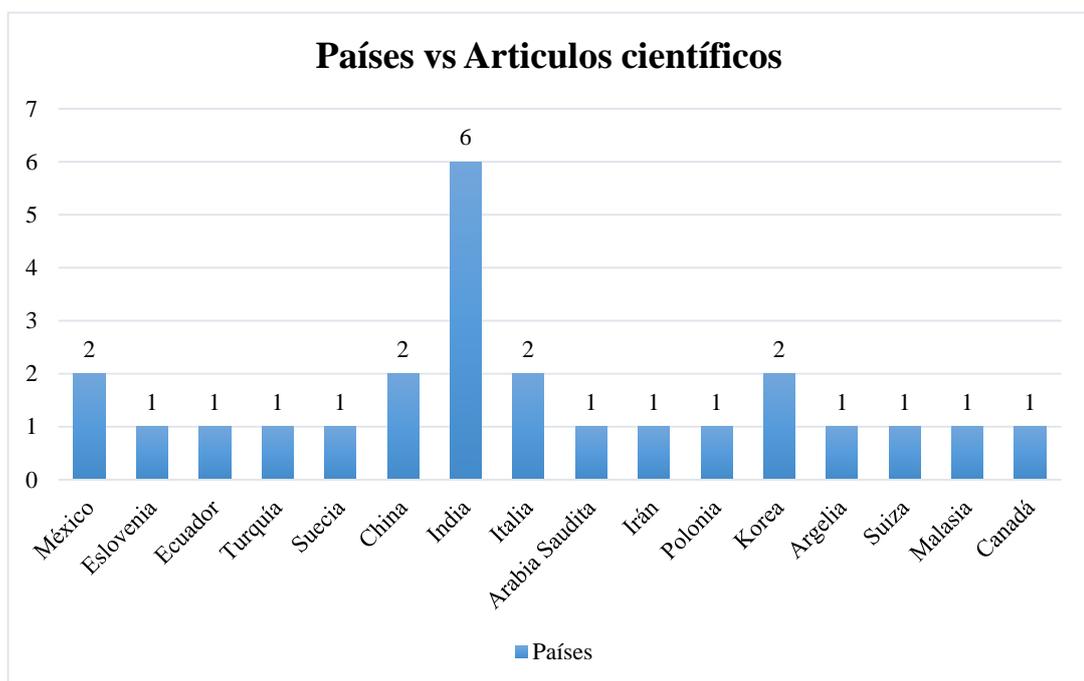
Realizado por: Aguirre César, 2021

El gráfico 3-3 indicó que el artículo científico estudiado que está publicado en la revista con numeral (12) pertenece al cuartil Q3 y los artículos científicos publicados en las revistas (4, 7, 8, 9, 11, 14) pertenecientes al cuartil Q2, esto apuntó a que estas revistas tienen una importancia relativa media. Mientras que las revistas (2, 5, 6, 10, 13) que pertenecen al cuartil Q1 son las revistas con una importancia relativa que ocupan el primer lugar en relación con las demás revistas estudiadas en este trabajo de integración curricular.

### 3.1.4. Países que investigan el desgaste en pastillas de freno

Es de vital importancia conocer de qué países provienen los artículos científicos que están constantemente innovando en el estudio del desgaste en pastillas de freno pertenecientes a vehículos utilitarios porque así se obtiene información acerca del aporte que cada país realiza con sus investigaciones aportando a nivel científico a las diferentes marcas que elaboran materias primas y materiales para el uso de las pastillas de freno.

A continuación, se detalla los países de los cuales pertenecen los 25 artículos científicos enumerados en la Tabla 1-2.



**Gráfico 3-3:** Países vs artículos científicos

**Realizado por:** Aguirre César, 2021

El gráfico 4-3 nos indicó que países como México, China, Italia, Corea tienen 2 artículos científicos cada uno y aportan de manera media a las investigaciones. Por otro lado, India es el país que tiene más artículos científicos en este estudio del análisis de los mecanismos de desgaste y es el que más aporta en investigaciones en cuestión de nuevos materiales, estudios acerca de fricción, materiales orgánicos y con emisiones bajas para el medio ambiente.

Actualmente, la industria de la India fabrica alrededor de vehículos de 26 millones, incluidos vehículos de pasajeros, vehículos comerciales, vehículos de tres ruedas, vehículos de dos ruedas y cuadriciclos en abril-marzo de 2020 de los cuales se exportan 4,7 millones. Se espera que la India sea el tercer mercado automotriz más grande del mundo en términos de volumen para 2026.

### **3.2. Discusión de resultados**

Mediante el estudio de las gráficas se obtuvieron resultados actualizados hasta el año 2020 en la página web “Scimago Journal & Country Rank” acerca del Factor-H, indicador SJR y clasificación de cuartiles de las revistas que se utilizó en el estudio de este trabajo de integración curricular.

Existen 2 artículos científicos (1) Análisis de los principales mecanismos de falla en tres frenos de disco automotrices, publicado en la revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada y (3) Diseño y construcción de un sistema para medir desgaste en forros de frenos de disco, publicada en la revista de Ciencia Digital. Siendo de México y Ecuador respectivamente.

Estos 2 artículos científicos son de carácter regional, es decir que no son de talla internacional y por lo tanto no entran en el ranking de “Scimago Journal & Country Rank” y no tienen valores en las gráficas mostradas anteriormente. Pero no por eso dejan de ser importantes para la investigación de este trabajo de integración curricular.

Los materiales más importantes encontrados en las pastillas de freno en los 5 artículos científicos extraídos mediante una caracterización alta entre los mismos han sido los siguientes: Carbono, cerámica, ferrosilicio, hierro, silicio, cobre, zinc, barita, grafito, titanato de potasio, aluminio, magnesio, manganeso, cloruro, potasio y sulfuro, entre otros. Generalmente esta es la composición que se encontró de manera general para todos los artículos científicos estudiados.

Los métodos y equipos de estudio utilizados para analizar los mecanismos de desgaste en las pastillas de freno son: Proceso de infiltración química de vapor, dinamómetro a escala de laboratorio,

equipo pin-on-disc, espectroscopía de fluorescencia de rayos X, espectroscopia de rayos X de energía dispersiva, microscopio óptico, microscopio electrónico de barrido, perfilómetro láser, microscopio de fuerza atómica, tratamiento térmico, pruebas de fricción y desgaste, prueba de micro dureza Vickers y Rockwell, entre otras. Estos métodos y equipos para analizar el desgaste son los que más se han utilizado en este estudio y por lo tanto son los más importante hasta la fecha según los artículos científicos encontrados en las diferentes bases de datos confiables.

Los mecanismos de desgaste encontrados en el estudio realizado en los 5 artículos científicos mencionados anteriormente fueron: desgaste abrasivo, desgaste por trioxidación, desgaste adhesivo, desgaste por deslizamiento. Estos tipos de desgaste se repiten un muchos de los artículos científicos no solo en los de mayor categorización sino en el resto de artículos científicos.

### 3.3. Dinámica del frenado

La principal fuerza que permite retardar el vehículo durante el proceso de frenado es aquella que ocurre en la superficie de la rueda como consecuencia de su contacto con la calzada, al aplicar dos pares que se oponen a su movimiento, es decir, las fuerzas de frenado.

Para obtener la deceleración de un vehículo se requiere una fuerza de frenado  $F$  constante, que anule la energía cinética después de cierto tiempo, durante el cual, recorre una distancia  $d$ .

Para el siguiente ejemplo se toma en consideración dos aspectos fundamentales de velocidad al momento del frenado. Primero se realiza el cálculo en un vehículo utilitario a 50 km/h que es la velocidad estándar en la que un vehículo se desempeña en la ciudad en una vía urbana. Segundo se toma en consideración el mismo vehículo utilitario a 90 km/h que es la velocidad en la cual se desempeña un vehículo en una autopista. Las condiciones de la calzada serán las más óptimas en asfalto normal y en clima seco.

A continuación, se muestra las fórmulas matemáticas para realizar el cálculo.

$$\text{Distancia de parada } d = d_i + V_i \cdot t + \frac{a \cdot t^2}{2} \quad (1)$$

$$\text{Desaceleración } a = \frac{V_f - V_i}{t} \quad (2)$$

$$\text{Fuerza de frenado } F = m \cdot a \quad (3)$$

Para el primer caso se realiza los cálculos para encontrar una fuerza de frenado en un vehículo de 1200 kg a una velocidad de 50 km/h con una desaceleración de  $5\text{m/s}^2$ , teniendo de realizar una maniobra de frenado para detenerlo con un tiempo de 5 segundos. Además de que espacio recorrerá en este tiempo.

Lo primero que se debe realizar es la conversión de 50 km/h a m/s para tener poder realizar los cálculos en unidades de medida similares.

$$V_i = 50 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 13,89 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Se utiliza la ecuación (2) donde la velocidad final va a ser cero porque detenemos el vehículo

$$a = \frac{0 - 13,89 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{5 \text{ s}} = -2,78 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Se obtiene una aceleración negativa porque el vehículo se está deteniendo y por eso la llamamos desaceleración.

Se utiliza la ecuación (3) para obtener la fuerza de frenado en Newton que se les aplica a los frenos de disco.

$$F = 1200 \text{ kg} \cdot (-2,78 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}) = -3336 \text{ N}$$

Por último, se utiliza la ecuación (1) para calcular la distancia de parada la cual el vehículo ha recorrido el vehículo hasta detenerse. La distancia inicial va a ser cero porque se empieza el cálculo al momento que inicia el frenado.

$$d = 0 + 13,89 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 5\text{s} + \frac{-2,78 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (5\text{s})^2}{2} = 34,7 \text{ m}$$

Para el segundo caso se realiza los cálculos para encontrar una fuerza de frenado del mismo vehículo de 1200 kg a una velocidad de 90 km/h con una desaceleración de  $5\text{m/s}^2$ , teniendo de realizar una maniobra de frenado para detenerlo con un tiempo de 5 segundos. Además de que espacio recorrerá en este tiempo.

Lo primero que se debe realizar es la conversión de 90 km/h a m/s para tener poder realizar los cálculos en unidades de medida similares.

$$V_i = 90 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Se utiliza la ecuación (2) donde la velocidad final va a ser cero porque detenemos el vehículo

$$a = \frac{0 - 25 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{5 \text{ s}} = -5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Se obtiene una aceleración negativa porque el vehículo se está deteniendo y por eso la llamamos desaceleración.

Se utiliza la ecuación (3) para obtener la fuerza de frenado en Newton que se les aplica a los frenos de disco.

$$F = 1200 \text{ kg} \cdot \left(-5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = -6000 \text{ N}$$

Por último, se utiliza la ecuación (1) para calcular la distancia de parada la cual el vehículo ha recorrido el vehículo hasta detenerse. La distancia inicial va a ser cero porque se empieza el cálculo al momento que inicia el frenado.

$$d = 0 + 25 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 5 \text{ s} + \frac{-5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (5 \text{ s})^2}{2} = 62,5 \text{ m}$$

Con los resultados obtenidos de los cálculos de los 2 casos se concluye que, para el mismo vehículo, pero a velocidades más altas se obtiene fuerzas de frenado mayores y esto implica que se fuerza a los discos a trabajar de manera más brusca y generamos desgaste en sus pastillas de manera prematura aun teniendo el mismo vehículo, pero en contextos operacionales de velocidad diferentes.

Cuando se rebasa el límite de la fuerza de frenado, en el caso del sistema de freno, se produce el bloqueo de las ruedas que deslizan sobre el pavimento y esto provoca que patinen. La fuerza de rozamiento y la de frenado están dirigidas en sentido opuesto al sentido de movimiento. Cuanto mayores sean el rozamiento y la fuerza de frenado, el automóvil frenará mejor.

## **CONCLUSIONES**

Se identificó con claridad todos los elementos que conforman una pastilla de freno de material compuesto, así como sus usos y su correcto diseño para vehículos utilitarios.

Se investigó sobre los principales mecanismos de desgaste que se generan durante el frenado con pastillas de material compuesto en los artículos científicos encontrados en las bases de datos de manera online.

Se realizó un análisis comparativo entre los artículos científicos con mayor índice de categorización, tomando en cuenta aspectos como materiales, métodos, equipos, coeficiente de fricción y mecanismos de desgaste encontrados en ellos.

## **RECOMENDACIONES**

Realizar el análisis en todos los tipos de alturas diferentes respecto al nivel del mar para así tener resultados más exactos en cuanto respecta a pastillas de freno en los vehículos utilitarios.

Tener una mayor capacitación a los técnicos al momento del montaje de las pastillas de freno ya que esto conlleva que un mal montaje da como resultados un desgaste acelerado en sus componentes.

Realizar más investigaciones con otros tipos de materiales aditivos a las pastillas de freno para así mejor su resistencia al desgaste.

Realizar una revisión de los frenos cada 15 000 a 20 000 kilómetros, o revisarse antes si el vehículo presenta alguna anomalía.

## BIBLIOGRAFÍA

**BATHE, R., SAI KRISHNA, V., NIKUMB, S.K., & PADMANABHAM, G.** "Laser surface texturing of gray cast iron for improving tribological behavior". *Applied Physics A: Materials Science and Processing* [en línea], 2014, (Netherlands) vol. 117, pp. 117-123. [Consulta: 11 mayo 2021]. ISSN 14320630. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00339-014-8281-y>

**BAUTISTA CHRISTIAN & MENA PATRICIO.** Investigación de materiales compuestos con fibra natural para la construcción de la carrocería del vehículo de competición fórmula student [En línea] (Trabajo de titulación). (Ingeniería) Universidad de las fuerzas armadas, Latacunga, Ecuador. 2018. pp. 24-26. [Consulta: 2021-04-15]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/14956>

**BIAN, G. & WU, H.** "Friction performance of carbon/silicon carbide ceramic composite brakes in ambient air and water spray environment". *Tribology International* [en línea], 2015, (United Kingdom) vol. 92, pp. 1-11. [Consulta: 17 mayo 2021]. ISSN 0301679X. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X15002224?via%3Dihub>

**BIJWE, J.** "Composites as friction materials: Recent developments in non-asbestos fiber reinforced friction materials - A review". *Polymer Composites* [En línea], 1997, (United States of America) vol. 18, pp. 378-396. [Consulta: 18 mayo 2021]. ISSN 02728397. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pc.10289>

**BORQUE ALBERTO & NOGUEIRA MARAR.** *Materiales compuestos-composites* [blog]. España 2007. [Consulta: 18 mayo 2021]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/208288669/materiales-compuestos-introduccion>

**CARBOTEQ.** *Indicación ultraprecisa del desgaste de discos de freno cerámicos de carbono.* [blog]. Switzerland 2017. [Consulta: 14 junio 2021]. Disponible en: [https://www.proceq.com/uploads/tx\\_proceqproductcms/import\\_data/files/Carboteq\\_Sales%20Flyer\\_Spanish\\_high.pdf](https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/Carboteq_Sales%20Flyer_Spanish_high.pdf)

**CUEVA, G., SINATORA, A., GUESSER, W.L. & TSCHIPTSCHIN, A.P.** "Wear resistance of cast irons used in brake disc rotors". *Wear* [en línea], 2003 (Netherlands), vol. 255, pp. 1256-1260. [Consulta: 15 junio 2021] ISSN 00431648. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164803001467?via%3Dihub>

**DIRA.** *Cómo funciona un servofreno.* [blog]. 2019. [Consulta: 14 junio 2021]. Disponible en: <http://dirasrl.com.ar/wp-content/uploads/2019/07/06-Cómo-funciona-un-Servofreno.pdf>

**FAN, S., ZHANG, L., CHENG, L., ZHANG, J., YANG, S. & LIU, H.** "Wear mechanisms of the C/SiC brake materials". *Tribology International* [en línea], 2011 (United Kingdom) vol. 44, pp. 25-28. [Consulta: 16 junio 2021]. ISSN 0301679X. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X10002173?via%3Dihub>

**FAN, S., ZHANG, L., XU, Y., CHENG, L., LOU, J., ZHANG, J. Y YU, L.** "Microstructure and properties of 3D needle-punched carbon/silicon carbide brake materials". *Composites Science and Technology* [en línea], 2007 (United Kingdom) vol. 67, pp. 2390-2398. [Consulta: 21 junio 2021]. ISSN 02663538. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266353807000437?via%3Dihub>

**FRANCISCO JOSÉ BAUZÁ FERNÁNDEZ.** Estudio del sistema de frenado en los vehículos ligeros (Trabajo de titulación) (Ingeniería). [en línea]. Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2018. pp. 32-35. [Consulta: 11 enero 2021]. Disponible en: [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/113326/REPORT\\_470.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/113326/REPORT_470.pdf)

**GREFA, L. & CASANOVA, P.** Implementación de un tablero didáctico de un sistema de frenado hidráulico con accionamiento manual, control de parada y presión de frenado electrónico, para el laboratorio de la escuela de ingeniería automotriz de la epoch (Trabajo de titulación) (Ingeniería). [en línea]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2015. pp. 72-78. [Consulta: 11 enero 2021]. Disponible en: <http://dspace.epoch.edu.ec/bitstream/123456789/2288/1/65T00043.pdf>

**HIGH POWER BRAKE.** *Manual técnico y de recomendaciones.* [blog]. 2018. [Consulta: 11 marzo 2021]. Disponible en: [https://www.highpowerbrake.com.ec/downloads/manual\\_tecnico\\_y\\_de\\_recomendaciones\\_high\\_power\\_brake.pdf](https://www.highpowerbrake.com.ec/downloads/manual_tecnico_y_de_recomendaciones_high_power_brake.pdf)

**INFORMACIÓN TÉCNICA TEXTAR.** *Evaluación de daños en pastillas de freno de disco.* [blog]. Alemania, 2015, [Consulta: 13 marzo 2021]. Disponible en: [https://textar.com/wp-content/uploads/2015/08/Textar\\_Fault-Assessment\\_ESP.pdf](https://textar.com/wp-content/uploads/2015/08/Textar_Fault-Assessment_ESP.pdf)

**LIEW, K.W. Y NIRMAL, U.** "Frictional performance evaluation of newly designed brake pad materials". *Materials and Design* [En línea]. 2013 (Netherlands) vol. 48, pp. 25-33. ISSN

18734197.

Disponible

en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306912005079>

**LOAYZA SIGCHO WILLIAM ANDRÉS.** Análisis comparativo de un disco de freno original frente a un alterno para un vehículo chevrolet aveo mediante simulación y pruebas experimentales [en línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2017. pp: 18-20. [Consulta: 2021-01-22]. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/6714/1/65T00227.pdf>

**MA, X., FAN, S., SUN, H., LUAN, C., DENG, J., ZHANG, L. & CHENG, L.** "Investigation on braking performance and wear mechanism of full-carbon/ceramic braking pairs". *Tribology International* [en línea], 2020, (United Kingdom), vol. 142, pp. 1-14. [Consulta: 03 Junio 2021] ISSN 0301679X Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X19304992>

**ÖSTERLE, W. Y URBAN, I.** "Third body formation on brake pads and rotors". *Tribology International* [en línea], 2006, (United Kingdom) vol. 39, pp. 401-408. [Consulta: 09 junio 2021] ISSN 0301679X. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X05001477>

**PICAS, J.A.** *Tribología-la ciencia de la fricción y el desgaste*. [blog]. 2017. [Consulta: 02 julio 2021]. Disponible en: <https://docplayer.es/49617255-Tribologia-la-ciencia-de-la-friccion-y-el-desgaste.html>

**RENZ, R., SEIFERT, G. Y KRENKEL, W.,** 2012. "Integration of CMC brake disks in automotive brake systems". *International Journal of Applied Ceramic Technology* [En línea], 2012, (United States) vol. 9, pp. 712-724. [Consulta: 09 julio 2021]. ISSN 1546542X. Disponible en: <https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1744-7402.2012.02812.x>

**SO, H., YU, D.S. y CHUANG, C.Y.** "Formation and wear mechanism of tribo-oxides and the regime of oxidational wear of steel". *Wear* [en línea], 2002, (Netherlands) vol. 253, pp. 1004-1015. [Consulta: 19 agosto 2021]. ISSN 00431648. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164802002302>

**STADLER, Z., KRNEL, K. y KOSMAČ, T.** "Friction and wear of sintered metallic brake linings on a C/C-SiC composite brake disc". *Wear* [En línea], 2008 (Netherlands) vol. 265, pp. 278-285. [Consulta: 18 julio 2021]. ISSN 00431648. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164807006862>

**SUTTER, G. & RANC, N.** "Flash temperature measurement during dry friction process at high sliding speed". *Wear* [en línea], 2010, (Netherlands) vol. 268, pp. 1237-1242. [Consulta: Agosto 15]. ISSN 00431648. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2010.01.019>.

**VELASTEGUI, A.** Los materiales de fricción y su influencia en la eficiencia de frenado (Trabajo de titulación). (Ingeniería), Universidad San Francisco, Quito, Ecuador. 2015, pp. 18-37. [Consulta: 2021-10-02]. Disponible en: <https://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/4627>

**XU, Y., ZHANG, Y., CHENG, L., ZHANG, L., LOU, J. y ZHANG, J.** "Preparation and friction behavior of carbon fiber reinforced silicon carbide matrix composites". *Ceramics International* [en línea], 2007 (United Kingdom), vol. 33, pp. 439-445. [Consulta: 10 octubre 2021]. ISSN 02728842. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884205003111?via%3Dihub>

**YANG, Z., HAN, J., LI, W., LI, Z., PAN, L. y SHI, X.** Analyzing the mechanisms of fatigue crack initiation and propagation in CRH EMU brake discs. *Engineering Failure Analysis* [en línea], 2013, (Netherlands) vol. 34, pp. 121-128. [Consulta: 12 octubre 2021]. ISSN 13506307. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S135063071300232X?via%3Dihub>.