



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**TEMA: MODELIZACIÓN MATEMÁTICA DEL DESGASTE EN PASTILLAS
DE FRENO DE VEHÍCULOS**

AUTORES:

AYRTON SAID ARROYO ISISAN

KEVIN IMBAQUINGO

DIRECTOR: PHD FERNANDO RAMÍREZ

Ibarra, 2023

CERTIFICADO**ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR**

En calidad de director del plan de trabajo de grado, previo a la obtención del título de Ingeniería Automotriz, nombrado por el Honorable Consejo Directivo de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas.

CERTIFICO:

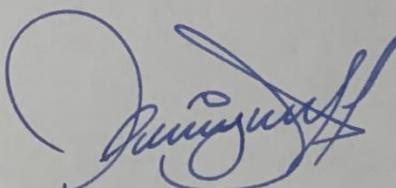
Que una vez analizado el plan de grado cuyo título es “Modelización matemática del desgaste de pastillas de freno de vehículos” presentado por: Arroyo Isisan Ayton Said con el número de cedula 100453875-5 y Imbaquingo Puentestar Kevin Ernesto con el número de cedula 172731063-1, doy fe que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a presentación pública y evaluación por parte de los señores integrantes del jurado examinador que designe.

En la ciudad de Ibarra, a los 31 días del mes de julio del 2023

Atentamente

Ing. Fernando Ramírez PhD.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO





UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	100453875-5
APELLIDOS Y NOMBRES:	Arroyo Isisan Ayrton Said
DIRECCIÓN:	Ibarra, Hernán Gonzales de Saa y vía a las canteras.
EMAIL:	asarroyoi@utn.edu.ec
TELÉFONO FIJO:	TELÉFONO MÓVIL: 0981424002

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	172731063-1
APELLIDOS Y NOMBRES:	Imbaquingo Puentestar Kevin Ernesto
DIRECCIÓN:	Montúfar, Parroquia La Paz, Pastora Alomía y Vicente Rocafuerte
EMAIL:	keimbaquingop@utn.edu.ec
TELÉFONO FIJO:	2979-404 TELÉFONO MÓVIL: 0979528095

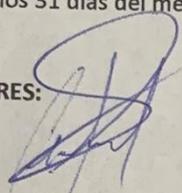
DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	MODELIZACIÓN MATEMÁTICA DEL DESGASTE EN PASTILLAS ED FRENO DE VEHÍCULOS
AUTOR (ES):	Arroyo Isisan Ayton Said Imbaquingo Puentestar Kevin Ernesto
FECHA: DD/MM/AAAA	31/07/2023
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERÍA AUTOMOTRÍZ
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Fernando Ramírez PhD.

2. CONSTANCIAS

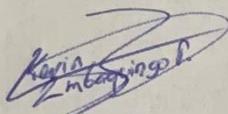
El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 31 días del mes de julio de 2023

EL AUTORES:



Arroyo Isisan Ayton Said
100453875-5



Imbaquingo Puentestar Kevin Ernesto
172731063-1

DEDICATORIA

A **DIOS** y la **MADRE DOLOROSA** por bendecirme, llenarme de sabiduría y guiarme para caminar por el camino correcto y cumplir mis metas.

A mis amados padres **RENE y NANCY** dedico con todo mi amor este trabajo de investigación, pues sin su amor incondicional y apoyo total durante toda mi vida no lo habría logrado, su bendición y esfuerzo de cada día son mi motivación diaria para ser una mejor persona y cumplir mis metas cada día.

A mi querida Hermana **AYLEEN KERLEY** por brindarme su cariño, comprensión, amor y ser el apoyo y la ayuda en el transcurso de mi vida para seguir adelante incluso en los momentos más difíciles.

A mi amado hijo **ELIAN SAID**, ya que sin ti no lo habría logrado pues tu generas en mi la motivación necesaria para ser mejor cada día y brindarte un buen futuro y una vida llena de muchas alegrías, te amo querido hijo.

A mi amada esposa **KAREN NICOLE** por ser mi apoyo y compañera durante este proceso.

AYRTON ARROYO

El presente trabajo de titulación va dedicado con mucho amor y gratitud a mis padres, pues considero que, gracias a ellos, a su apoyo y esfuerzo constante ha sido posible el desarrollo de este, es a ellos a quien debo todo éxito que sea capaz de cosechar en mi vida y también a quien por siempre dedicaré cada meta que consiga alcanzar.

A mi novia, Juli, quien, con su compañía, palabras de aliento y sobre todo amor se ha convertido en la motivación perfecta para cumplir con todas mis metas, para reponerme a cualquier tropiezo y a convertirme en una mejor persona y en un mejor profesional. A motivarme siempre a seguir adelante aun cuando pensaba que rendirme era la única opción. Por demostrarme que sin importar cual sea el problema ella siempre me mostrará el camino para resolverlo, aunque no lo comprenda en su totalidad.

KEVIN IMBAQUINGO

AGRADECIMIENTO

A **DIOS** y la **MADRE DOLOROSA** por su presencia en mi vida para llegar al éxito.

A la **UNIVERSIDAD TECNICA DEL NORTE**, templo del saber por brindarme la oportunidad de potenciar mi conocimiento a lo largo de mi carrera, hacer grandes amistades con mis compañeros y docentes.

De Igual manera quiero agradecer a mis profesores que durante toda mi vida académica me han sabido guiar y apoyar en mi crecimiento intelectual, de manera especial a mi Tutor de Tesis Ing. Fernando Ramírez PhD. por impartir sus conocimientos, experiencia, profesionalismo y sobre todo por ese don de persona que con rectitud y exigencia guio paso a paso el desarrollo de este trabajo de grado de forma desinteresada e incondicional, así mismo al Ing. Ramiro Rosero MSc. por sus recomendaciones, sugerencias y consejos para el buen desarrollo de esta investigación.

AYRTON ARROYO

Agradezco a mi madre y a mi padre por todo el apoyo incansable que me han brindado durante todos los años de mi formación académica. Por construir un hogar lleno de amor a donde sé que siempre que lo necesite puedo recurrir y encontrarlo con las palabras adecuadas para aconsejarme, corregirme y sobre todo guiarme para ser una mejor persona. Quiero agradecerles por hacer tanto de mi como de mis hermanos una prioridad en sus vidas, por todos los valores con los que me han educado, por todos los momentos amenos y felices que hemos compartido y por hacerme sentir que sin importar cuán lejos me encuentre de ellos su apoyo y guía jamás me faltará.

A la Universidad Técnica del Norte, por ser el lugar donde he adquirido tantos conocimientos y he vivido mi desarrollo profesional. A los docentes de la carrera de Ingeniería Automotriz por todos los conocimientos impartidos en las Aulas, destacando al Ing. Fernando Ramírez PhD. director del proyecto de titulación, Ing. Ramiro Rosero MSc. Cuya guía ha sido fundamental para llevar el desarrollo del presente escrito a buen puerto.

KEVIN IMBAQUINGO

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I.....	1
1 ANTEPROYECTO	1
1.1 Objetivos.....	1
1.1.1 Objetivo general	1
1.1.2 Objetivos específicos.....	1
1.2 Justificación	1
1.3 Alcance	2
1.4 Antecedentes.....	2
1.5 Contexto.....	4
1.6 Situación actual.....	5
1.7 Prospectiva.....	5
CAPÍTULO II.....	7
2 MARCO TEÓRICO	7
2.1 Sistema de frenado.....	7
2.1.1 Tipos de sistemas.....	7
2.1.1.1 Sistemas de freno mecánico	7
2.1.1.2 Sistema de freno hidráulico.....	8
2.1.1.3 Sistema de freno neumático	10
2.1.2 Tipos de frenos	11
2.1.2.1 Freno de tambor	11
2.1.2.2 Freno de disco	12
2.1.2.3 Tipo de freno más empleado en el mercado ecuatoriano	14
2.2 Pastillas de freno.....	15
2.2.1 Tipos de pastilla de frenos	15
2.2.1.1 Pastillas de freno orgánicas	15
2.2.1.2 Pastillas de freno semi metálicas.....	16
2.2.1.3 Pastillas de freno cerámicas	16
2.2.2 Composición de las pastillas de freno	16
2.2.2.1 Fibras.....	17
2.2.2.2 Cargas minerales	17
2.2.2.3 Componentes metálicos.....	18
2.2.2.4 Lubricantes	18
2.2.2.5 Ligantes orgánicos.....	18

2.2.2.6	Materiales abrasivos.....	18
2.2.3	Normativa de las pastillas de freno.....	18
2.2.3.1	Comportamiento del coeficiente de fricción (método de ensayo fast)...	20
2.3	Tribología: métodos y ensayos	21
2.3.1	Fundamentos.....	21
2.3.2	Mecanismos genéricos de desgaste	22
2.3.2.1	Desgaste abrasivo.....	22
2.3.2.2	Desgaste erosivo.....	23
2.3.2.3	Desgaste adhesivo	23
2.3.2.4	Desgaste por cavitación.....	23
2.3.2.5	Desgaste químico	24
2.3.3	Ensayos.....	24
2.3.3.1	Ensayo de impacto o péndulo de charpy	24
2.3.3.2	Ensayo pin on disk	25
2.3.3.3	Ensayo de abrasión por medio de arena seca	26
2.3.3.4	Ensayo de dureza Brinell.....	26
2.3.4	Temperatura en el sistema de freno.....	28
2.3.4.1	Temperatura en pastillas y disco de freno.....	28
2.3.4.2	Temperatura como factor que interviene en la eficiencia de frenado	28
2.3.4.3	Cristalización de las pastillas de freno	28
CAPÍTULO III		30
3	MARCO METODOLÓGICO	30
3.1	Normativa astm g-65.....	30
3.1.1	Equipo de prueba	30
3.1.1.1	Rueda de caucho.....	30
3.1.1.2	Abrasivo	31
3.1.1.3	Boquilla de arena.....	31
3.1.1.4	Porta muestras y brazo de palanca	32
3.1.1.5	Preparación de la muestra	32
3.1.1.6	Parámetros de prueba	32
3.2	Ensayo.....	34
3.2.1	Cálculo de las masas en las pesas	34
3.2.1.1	Diagrama del cuerpo libre del brazo de palanca	34
3.2.1.2	Cálculos.....	34

3.2.2	Procedimiento del ensayo.....	37
3.2.2.1	Procedimiento escogido	37
3.2.2.2	Procedimiento de funcionamiento.....	37
3.3	Construcción del modelo matemático.....	38
3.3.1	Modelos empíricos	38
3.3.1.1	Modelo de regresión.....	39
3.4	Cálculo de las áreas de contacto y presiones sobre la probeta.....	46
3.4.1	Cálculo del área de contacto.....	47
3.4.2	Cálculo de la presión sobre la probeta.....	47
CAPITULO IV		48
4	RESULTADOS Y ANALISIS.....	48
4.1	Ensayos	48
4.1.1	Comprobación del flujo de arena.....	48
4.1.2	Comprobación del disco recubierto.....	49
4.1.3	Comprobación de la rpm del motor	49
4.1.4	Preparación de las probetas	49
4.1.5	Resultados de los ensayos.....	50
4.2	Modelamiento	55
4.2.1	Modelamiento para el desgaste en amianto con carga de 90 N.....	55
4.2.2	Modelamiento para el desgaste en amianto	62
4.2.3	Modelamiento para el desgaste en cerámicas.....	63
4.2.4	Coeficientes del modelo	65
4.2.4.1	Coeficientes para el desgaste sobre probetas de amianto.....	65
4.2.4.2	Coeficientes para el desgaste sobre probetas cerámicas	65
4.3	Validación de los resultados	66
4.3.1	Determinación del factor K	67
4.4	Modelo general	71
CAPÍTULO V.....		75
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	75
5.1	Conclusiones.....	75
5.2	Recomendaciones	76
REFERENCIAS		77
ANEXO		83

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA NUM.	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
Figura 2.1	Esquema del freno mecánico	8
Figura 2.2	Esquema de los circuitos del freno hidráulico	10
Figura 2.3	Esquema del sistema de freno neumático	11
Figura 2.4	Freno de tambor	12
Figura 2.5	Freno de disco	14
Figura 2.6	Bloques de madera	15
Figura 2.7	Composición de pastillas de freno	17
Figura 2.8	Péndulo de Charpy	25
Figura 2.9	Pin on disk diagrama	25
Figura 3.1	Diagrama esquemático del equipo de pruebas	30
Figura 3.2	Dimensiones pieza 1, vista superior	31
Figura 3.3	Dimensiones pieza 1 de la boquilla, vista lateral	31
Figura 3.4	Dimensiones pieza 3 y 4 de la boquilla	32
Figura 3.5	Boquilla ensamblada	32
Figura 3.6	Diagrama de cuerpo libre para el cálculo de esfuerzos	34
Figura 3.7	Diagrama de dispersión del desgaste de la probeta en el tiempo	40
Figura 3.8	Cuerda en la circunferencia del disco recubierto	46
Figura 3.9	Triángulo rectángulo de la circunferencia	47
Figura 4.1	Comportamiento del desgaste de las probetas de amianto en el tiempo	53
Figura 4.2	Comportamiento del desgaste de las probetas cerámicas en el tiempo	53
Figura 4.3	Variación del desgaste en las probetas de amianto por cada intervalo de ensayo	54
Figura 4.4	Presión aplicada sobre las probetas en el tiempo	55
Figura 4.5	Comparación del modelo con los valores experimentales	57
Figura 4.6	Comportamiento del modelo posterior a los 600 s	57
Figura 4.7	Comportamiento de la variación del desgaste	59
Figura 4.8	Comparación entre los valores experimentales y el modelo propuesto	62
Figura 4.9	Verificación del ajuste entre los valores experimentales y el modelo propuesto (amianto)	63
Figura 4.10	Verificación del ajuste entre los valores experimentales y el modelo propuesto (cerámica)	64
Figura 4.11	Comparación de desgaste entre el modelo de Archard, el modelo propuesto y valores experimentales de amianto	68
Figura 4.12	Comparación de desgaste entre el modelo de Archard, el modelo propuesto y valores experimentales de amianto	69
Figura 4.13	Comparación de desgaste entre el modelo de Archard, el modelo propuesto y valores experimentales de pastillas cerámicas	70
Figura 4.14	Comparación de desgaste entre el modelo de Archard, el modelo propuesto y valores experimentales de amianto	71
Figura 4.15	Comparación de valores de desgaste entre los modelos individuales y el modelo general en amianto	72

Figura 4.16 Comparación de valores de desgaste entre los modelos individuales y el modelo general en las probetas cerámicas

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA NUM.	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
Tabla 2.1	Presiones en el circuito con y sin servofreno	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 2.2	Diez vehículos más vendidos en Ecuador y tipo de freno que emplean	14
Tabla 2.3	Código de los coeficientes de fricción	19
Tabla 2.4	Composición del material	20
Tabla 2.5	Tamaño de la bola del indentador	27
Tabla 3.1	Parámetros de ensayo	32
Tabla 3.2	Valores de desgaste experimentales con 90 N de carga	39
Tabla 3.3	Error del modelo con respecto a los datos experimentales	45
Tabla 4.1	Resultados de las pruebas de flujo de arena	48
Tabla 4.2	Resultados de las pruebas en la velocidad del disco	49
Tabla 4.3	Dimensiones de las probetas	50
Tabla 4.4	Masa de las probetas de amianto por cada intervalo de ensayo	50
Tabla 4.5	Masa de las probetas cerámicas por cada intervalo de ensayo	51
Tabla 4.6	Masa perdida por las probetas de amianto en cada intervalo de ensayo	51
Tabla 4.7	Masa perdida por las probetas cerámicas en cada intervalo de ensayo	52
Tabla 4.8	Coefficientes de desgaste (amianto)	56
Tabla 4.9	Coefficientes de desgaste (cerámica)	56
Tabla 4.10	Cambio de variable, cálculo de valores	59
Tabla 4.11	Coefficientes de desgaste (amianto)	62
Tabla 4.12	Coefficientes de desgaste (amianto)	64

ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN NUM.	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
[2.1]	Ecuación de dureza Brinell	27
[3.1]	Ecuación de valores medios de desgaste por regresión	40
[3.2]	Ecuación de desgaste de regresion generalizada	40
[3.3]	Ecuación de la suma de cuadrados del error	41
[3.4]	Representación de las ecuaciones derivadas de SCE	42
[3.5]	Ecuacion para el cálculo de los coeficientes del modelo	44
[3.6]	Modelo de desgaste polinómico obtenido sobre los datos directamente	44
[3.7]	Ecuacion de la variabilidad del modelo de regresion con los datos experimentales	46
[3.8]	Ecuación para el cálculo del ángulo para determinar la logitud del arco	47
[3.9]	Longitud del arco	47
[3.10]	Fórmula de la presión aplicada sobre una superficie	47
[4.1]	Derivada del modelo de desgaste en las probetas de amianto a 90 N de carga	55
[4.2]	Modelo de desgaste en las probetas de amianto a 90 N de carga	56
[4.3]	Representación general del desgaste abrasivo para probetas de amianto	56
[4.4]	Representación general del desgaste abrasivo para probetas cerámicas	56
[4.5]	Representacion de una ecuación potencial	58
[4.6]	Linealizacion de la ecuación potencial	58
[4.7]	Derivada de desgaste con respecto al tiempo	61
[4.8]	Modelo potencial del desgaste en pastillas de amianto con 90 N de carga	61
[4.9]	Modelo potencial del desgaste en pastillas de amianto con 90 N de carga ajustada	61
[4.10]	Representación general del desgaste mediante ecuacion potencial para amianto	62
[4.11]	Representación general del desgaste mediante ecuacion potencial en probetas cerámicas	64
[4.12]	Ecuación del coeficiente a en función de la carga aplicada para el modelo de desgaste en amianto	65
[4.13]	Ecuación del coeficiente b en función de la carga aplicada para el modelo de desgaste en amianto	65
[4.14]	Ecuación del coeficiente c en función de la carga aplicada para el modelo de desgaste en amianto	65
[4.15]	Ecuación del coeficiente d en función de la carga aplicada para el modelo de desgaste cerámico	65
[4.16]	Ecuación del coeficiente e en función de la carga aplicada para el modelo de desgaste cerámico	65
[4.17]	Ecuación del coeficiente f en función de la carga aplicada para el modelo de desgaste cerámico	65
[4.18]	Ecuacion de desgaste abrasivo propuesta por Archard	66
[4.19]	Formula de la densidad	66
[4.20]	Formula de la distancia de deslizamiento	66
[4.21]	Formula de la velocidad tangencial	66
[4.22]	Formula de deslizamiento despejada	66
[4.23]	Ecuacion para el calculo de la masa perdida a partir de la ecuacion de Archard	67

[4.24] Ecuacion para el calculo del factor K a partir de la ecuacion de Archard	67
[4.25] Ecuacion para el calculo de la masa perdida a partir de la ecuacion de Archard para desgaste en amianto	67
[4.26] Ecuacion para el calculo de la masa perdida a partir de la ecuacion de Archard para desgaste cerámico	67
[4.27] Modelo general potencial para el desgaste de las probetas de amianto	72
[4.28] Modelo general potencial para el desgaste de las probetas cerámicas	72

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO NUM.	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
ANEXO I	Variación del desgaste en amianto a 90 N y probeta posterior a los ensayos realizados	84
ANEXO II	Variación del desgaste a 90 N de carga	85
ANEXO III	Cálculo del coeficiente C en el modelamiento potencial	86
ANEXO IV	Desgaste obtenido mediante el modelo propuesto a 90 N de carga y su comparación con los valores experimentales	87
ANEXO V	Comparación entre los valores reales y el modelo propuesto a 110 N de carga y la probeta sobre la que se realizó el ensayo	88
ANEXO VI	Valores de desgaste experimental y obtenidos por el modelo propuesto a 130 N de carga y la probeta sobre la que se realizó el ensayo	89
ANEXO VII	Comparación valores de desgaste experimentales y calculados por el modelo propuesto a 150 N y la probeta sobre la que se realizó el ensayo	90
ANEXO VIII	Comparación de valores experimentales y valores del modelo propuesto con 90 N de carga (cerámica) y la probeta sobre la que se realizó el ensayo	91
ANEXO IX	Valores de desgaste experimentales y modelo propuesto con 110 N de carga (cerámica) y la probeta sobre la que se realizó el ensayo	92
ANEXO X	Valores de desgaste experimentales y modelo propuesto con 130 N de carga (cerámica) y la probeta sobre la que se realizó el ensayo	93
ANEXO XI	Valores de desgaste experimentales y modelo propuesto con 150 N de carga (cerámica) y la probeta sobre la que se realizó el ensayo	94
ANEXO XII	Disco recubierto, comprobación de la velocidad del equipo y ensayo en el equipo de la normativa ASTM G-65	95

RESUMEN

El presente trabajo de investigación analiza la situación actual de vehículos con respecto al sistema de frenos y tiene el propósito de identificar las variables que intervienen en el desgaste de pastillas de freno. Para cumplir con dicho propósito en laboratorio de la carrera de Ingeniería Automotriz de la Universidad Técnica del Norte se realizaron ensayos de desgaste por abrasión en dos tipos de pastillas de materiales cerámicos y asbesto. Para el ensayo se diseñaron 4 probetas por cada tipo pastilla, a cada una de las probetas se aplicó carga de 90 N, 110 N, 130N y 150 N, velocidad de 200 rpm y 20 repeticiones con una duración de 30 segundos en cada probeta hasta completar los 10 minutos del ensayo. El equipo utilizado fue la máquina de desgaste por abrasión regulada en la normativa ASTM G-65.

De acuerdo con el comportamiento del desgaste con los resultados obtenidos se plantearon modelos matemáticos de tipo polinómicos y potenciales sujetos a las variables: desgaste de la pastilla, tiempo y carga aplicada. Con el método de regresión se determinó la relación existente entre las diferentes variables identificadas y también el modelo que describe el desgaste. Posteriormente se utilizó el modelo matemático de Archard para validar el modelo matemático propuesto en el presente trabajo. Posterior a la comparación entre el modelo y la ecuación de Archard se determinó que el modelo presenta un mejor ajuste con respecto a los valores experimentales.

Los dos modelos planteados en el presente trabajo cumplen con describir el desgaste experimental con un bajo porcentaje de error, sin embargo, únicamente uno de ellos es capaz de ofrecer valores de desgaste realistas más allá del dominio de modelación.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
EMPRESA PÚBLICA "LA UEMEPRENDE E.P."



ABSTRACT

This research work analyzed the current situation of vehicles brake system and aimed to identify the variables involved in brake pad wear. For this purpose, abrasion wear tests were carried out on ceramic and asbestos brake pads in the laboratory of the Automotive Engineering Department at Técnica del Norte University. For the test, 4 specimens were designed for each type of pad; each specimen was subjected to a load of 90 N, 110 N, 130 N and 150 N, a speed of 200 rpm and 20 repetitions with a duration of 30 seconds on each specimen until completing the 10 minutes of the test. The equipment used was the abrasion wear machine regulated in the ASTM G-65 standard.

According to the wear behavior of the results obtained, polynomial and potential mathematical models were developed for the following variables: pad wear, time and applied load. The regression method was used to determine the relationship between the different variables identified and also the model describing the wear. Subsequently, Archard's mathematical model was used to validate the mathematical model proposed in this work. After the comparison between the model and Archard's equation, it was determined that the model presents a better fit with respect to the experimental values.

The two models proposed in this study comply with describing the experimental wear with a low percentage of error; however, only one of them can be used as a predictive model.

Keywords: Brake system, brake pads, regression method, specimens, mathematical modeling, wear mechanisms.

Reviewed by:
 MSc. Luis Paspuezán Soto
 CAPACITADOR-CAI
 Julio 31, 2023

INTRODUCCION

La industria automotriz en Ecuador ha crecido notablemente debido a la importancia que tiene en los habitantes sobre todo de aquellos que desempeñan labores de traslado de mercancía de un lugar a otro, transporte público y privado considerados así parte del desarrollo económico del país. Por lo tanto, la aplicación de nuevas tecnologías en caminadas a las mejoras y aumento en la velocidad, seguridad y comodidad de los vehículos han hecho que se evalúen los sistemas de frenado y principalmente las pastillas de freno, esto con el fin de predecir su vida útil.

Las pastillas de frenos presentan una vida útil promedio de 20000Km dependiendo de los materiales de fabricación, así como también de otros factores tales como la geografía de la ciudad, la velocidad, el paso del tiempo, la corrosión, abrasión, adhesión y erosión.

Por estas razones el presente estudio tiene como objetivo la modelización del fenómeno de desgaste identificando las variables que intervienen en el desgaste de las pastillas de freno. Para obtener valores de desgaste con los cuales trabajar y construir el modelo se han realizado ensayos en la máquina de ensayo con arena seca, descrito en la normativa ASTM G-65. Los ensayos se han realizado sobre dos tipos de probetas de materiales de pastillas de freno, fin de identificar como cambia el comportamiento del desgaste. Posteriormente a obtener los datos los mismos fueron tabulados y ordenados para facilitar la construcción del modelo matemático que describe el comportamiento identificado experimentalmente

CAPÍTULO I

1 ANTEPROYECTO

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Determinar cuáles son las variables que intervienen en el desgaste de pastillas de freno y su relación matemática.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar un estudio diagnóstico en cuanto a los materiales y mecanismos utilizados en sistemas de frenado en el campo automotriz.
- Determinar cuáles son los mecanismos de desgaste que intervienen en la pérdida de material de pastillas de freno.
- Analizar las variables que intervienen en el proceso de desgaste abrasivo de las pastillas de freno y su relación causal.
- Proponer un modelo matemático mediante las variables identificadas que describa el desgaste de las pastillas de freno y su proceso de validación.

1.2 Justificación

Este trabajo se sustenta normativamente en el plan de creación de oportunidades del gobierno ecuatoriano en sus objetivos de eje social en específico el objetivo 7 que trata sobre potenciar las capacidades de la ciudadanía y promover una educación innovadora, inclusiva y de calidad en todos los niveles, específicamente, en su política 7.4. De este modo se fortalece el sistema de educación superior bajo los principios de libertad, autonomía responsable, igualdad de oportunidades, calidad y pertinencia; promoviendo la investigación de alto impacto.

Con este fundamento normativo se emprende la propuesta de un modelo matemático del desgaste de pastillas de frenos. Este proceso será realizado con la ayuda de equipos tecnológicos disponibles en laboratorios y con base en literatura especializada. Todo esto con la finalidad de determinar las variables que afectan al deterioro de dichas pastillas y su impacto en el desempeño del automóvil. Para ello se utilizarán graficas que permiten evaluar

el comportamiento del material desgastado en relación con distintas variables como la presión, velocidad, tiempo, entre otras. Todo esto con el fin de predecir la vida útil de las pastillas de freno de vehículos livianos (Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025 de Ecuador | Observatorio Regional de Planificación Para El Desarrollo, n.d.).

1.3 Alcance

En el presente trabajo de titulación se propone la generación de un modelo matemático que describa la evolución del desgaste en el material de distintas pastillas de freno utilizadas en vehículos livianos, mediante los valores de desgaste abrasivo obtenidos experimentalmente con el equipo descrito en la normativa ASTM G-65. El proceso de investigación en tribología es dinámico, para el caso particular de este estudio la tribología se entiende al estudio de la fricción entre superficies, por lo que las herramientas a utilizar en este trabajo van desde la información estadística publicada en literatura especializada hasta ecuaciones diferenciales de desgaste validadas. Los materiales de pastilla estudiados en el presente trabajo serán los más comunes en el mercado local. El producto final será una ecuación capaz de describir la evolución del desgaste de pastillas de freno.

1.4 Antecedentes

El sistema de frenado constituye el dispositivo de seguridad activa más funcional al momento de garantizar la fiabilidad de movimiento de un vehículo (Chandradass, Baskara Sethupathi, & Amutha Surabi, 2021, p. 2). Dentro de este sistema el elemento que garantiza que cumpla su función mediante la fricción son las pastillas de freno. Estos elementos están constituidos por una placa de acero, a la cual se le une un material de fricción que entra en contacto con el disco en el frenado. Las pastillas transforman la energía cinética en energía térmica por acción de la fricción (Chandra Verma et al., 2015, p. 3).

En la fabricación de pastillas de freno se destacan dos materiales, uno de ellos es el cobre, material muy usual en la fabricación de materiales de fricción. El cobre aporta integridad estructural al elemento mecánico además de poseer alta ductilidad y apreciable lubricidad a altas temperaturas. Desde el punto de vista térmico, este material ofrece una alta conductividad y facilita la disipación del calor (Kalel, Bhatt, Darpe, & Bijwe, 2021, p. 3). En contraparte el cobre tiene la capacidad de crear desequilibrios en las cadenas alimenticias acuáticas, por lo que se ha optado por buscar una alternativa para reemplazarlo. Destino similar tuvo el segundo material destacado en la fabricación de pastillas de freno: el asbesto.

Este material fue utilizado para reforzar compuestos poliméricos, contando con buenas características incluso a altas temperaturas. Debido a que se observaron características peligrosas para el medio ambiente y para la salud por sus efectos cancerígenos, tuvo que dejarse de utilizar a partir de la década de 1980 (Jacob Moses, Suresh Babu, & Ananda Kumar, 2020). Así, en las últimas décadas se ha trabajado en el desarrollo de materiales que puedan ser útiles para la aplicación en pastillas de freno. Entre los materiales más destacados se encuentran el PKS de cascara de palmiste y el HTKS de cascara de semilla hyphaene the baica (Arman, Singhal, Chopra, & Sarkar, 2018, p. 2).

La utilización de aleaciones de titanio registra buenos resultados en pastillas de freno para vehículos de alta gama. Entre sus ventajas principales se encuentra la resistencia a la fractura de baja densidad (Selvam, Pugazhenthii, Dhanasekaran, Chandrasekaran, & Sivaganesan, 2021, p. 3).

El desgaste de los frenos constituye uno de los contribuyentes más significativos de emisiones de partículas, siendo estas de alrededor del 21% del total relacionado con el tráfico humano (Cai, Zhang, Nie, Tjong, & Matthews, 2020, p. 4). Esto ha motivado a la comprensión de la naturaleza del desgaste y al diseño de estrategias para contrarrestarlo, haciendo necesario el estudio de los mecanismos de desgaste. Estos trabajos de investigación han confirmado que se trata de un sistema complejo de difícil predictibilidad debido a las variaciones de contacto que se dan en el sistema, siendo el campo de investigación en desgaste de materiales una línea muy activa a nivel mundial (Laguna-Camacho et al., 2015, p. 4).

Un fenómeno muy importante que ocurre dentro de los sistemas de frenado es la fricción estática por corrosión ya que esto se produce en la pastilla del freno provocando un bloqueo en el disco de hierro. También produce ruido por desprendimiento y la eliminación de grumos de la pastilla de freno (Gweon, Park, Lee, Kim, & Jang, 2021, p. 3). Un factor importante en el desempeño de un sistema de frenos es la contaminación que las pastillas producen, por este motivo se emplean pastillas a base de cerámica la cual presenta mejoras debido a su alta resistencia al desgaste (Seo, Park, Kim, Lee, & Jang, 2021, p. 3).

El cobre al ser el material más usado en las pastillas de freno por sus características estructurales y térmicas también presenta algunas desventajas entre las cuales resaltan el ruido y la vibración que produce en el frenado, para contrarrestar estos efectos se han

desarrollado pastillas con niveles altos de acero inoxidable las cuales brindan mejoras significativas (Kalel, Darpe, & Bijwe, 2021, p. 4). Otra alternativa para el mejoramiento en el frenado es el refuerzo en el material de fricción del frenado con fibras hechas de acero, mineral, celulosa y aramida. Con estos materiales se realizaron pruebas de fricción con un tribómetro tipo Krauss en cámara ambiental con contador óptico de partículas. Los resultados mostraron que el uso de fibra de acero y fibra de aramida generan las emisiones de frenado más altas y bajas, respectivamente. La fibrilación de celulosa y aramida fortaleció las películas de fricción en la superficie de la almohadilla y redujo las emisiones de los frenos al mejorar la resistencia al desgaste, esta reducción de emisiones fue promovida por la re-incrustación de residuos de desgaste en la superficie de la pastilla durante el deslizamiento. Estas observaciones sugieren que la emisión de partículas al aire por desgaste del sistema de frenos podría reducirse reforzando el material de fricción con fibras (Song, Park, Choi, Lee, & Jang, 2021, p. 3). Al estudiar las relaciones existentes entre la temperatura, la rigidez del acoplamiento y el coeficiente de fricción se ha determinado que la rigidez del acoplamiento de contacto depende de las temperaturas alcanzadas. La relación entre el coeficiente de fricción y la temperatura se observa de forma indirecta a través de las tendencias de ruido en el frenado. Se han observado diferentes bandas de frecuencia que varían con la temperatura (Gao, Du, Ruan, & Yan, 2021, p. 3).

Se realizan investigaciones de las partículas (PM) las cuales son emitidas durante la aplicación de los frenos, enfocándose en el efecto del tamaño del circón. Los resultados muestran que la concentración, la distribución del tamaño y la composición de PM son fuertemente influenciado por el tamaño de las partículas de circón. El contenido de hierro en partículas ultrafinas fue mayor cuando se usaron pequeñas partículas de circón en la almohadilla, mientras que las partículas gruesas de circón produjeron un alto contenido de hierro en las partículas de desgaste más grandes, lo que sugiere que la cantidad y la química de las partículas inducidas por los frenos se rigen por diferentes mecanismos de desgaste en la interfaz deslizante, que dependen del tamaño del abrasivo (Park et al., 2021, p. 2).

1.5 Contexto

Según Álvarez Mejía y Narváez Simbaña (2020) quienes analizaron el desgaste por abrasión de material de las pastillas de freno concluyen que las pastillas de frenos metálicas y de carbón con sus respectivos porcentajes de desgaste, inferiores al 6%, son la mejor opción para vehículos de uso personal y de servicio, mientras que las pastillas de freno cerámicas

tienen un rendimiento de frenado superior siendo su inconveniente que requieren de mantenimiento prematuro.

Según Velasteguí Carrillo (2015) destaca que tras los estudios realizados las pastillas de freno de composición semimetálicas ejercen mayor fuerza de frenado, lo que consecuentemente indicará una eficiencia de frenado superior también, también resaltan que las pastillas de constitución cerámica tienen mayor resistencia a altas temperaturas, pero una fuerza de frenado inferior.

Según Zambrano Santos y Viláñez Ponce (2018) quienes estudiaron las diferencias de desgaste existente en pastillas de freno en pruebas realizadas al nivel del mar y a 2500 m.s.n.m, concluyeron que los desgastes por adhesión y por fatiga son iguales en ambas circunstancias, sin embargo, el provocado por corrosión y abrasión son mayores a nivel de mar gracias a la temperatura y humedad, lo cual debe ser tomado en cuenta para estudios futuros e incluso modelamientos de desgaste.

1.6 Situación actual

Muchos investigadores han realizado estudios utilizando diferentes tipos de materiales, enfocándose en disminuir el desgaste de las pastillas de freno y tratando de reemplazar materiales que a pesar de sus buenas características para la aplicación en el frenado presentan efectos adversos tanto para la salud como para el medio ambiente, generar un modelo el cual establezca el comportamiento de las pastillas de freno en cuanto a desgaste resultaría útil previo al momento de realizar cualquier tipo de ensayo.

1.7 Prospectiva

Mediante el análisis de modelos matemáticos desarrollados para el estudio del desgaste de las pastillas freno se tomarán las diferentes variables que actúan en dicho sistema como son la temperatura, fricción, presión, factores ambientales, tiempo que dura la pastilla, material del cual está construido la pastilla. Esto permitirá emitir un diagnóstico preciso del tiempo que dura en deformarse la pastilla y así brindar una solución con un material más resistente después de aprobar las pruebas realizadas.

Con esto se garantiza una mayor eficiencia en el trabajo de frenado reduciendo considerablemente las emisiones contaminantes y aumentando el factor de Seguridad y su vida útil

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Sistema de frenado

Es un sistema que permite que el vehículo disminuya la velocidad durante la conducción e incluso se detenga si es necesario. Según la ley de conservación de la energía el principio en el que se fundamenta este sistema de frenado es la transformación de la energía cinética relacionada a la velocidad y masa del vehículo, en energía térmica. Este proceso se activa cuando el conductor pisa el pedal del freno durante la marcha. La fuerza aplicada al pedal es transmitida y multiplicada por el sistema de frenos lo que provoca la disminución de la velocidad y finalmente la parada de marcha (Vaca Solís, 2014, p. 1).

El sistema de frenado es uno de los más importantes de los sistemas de seguridad activa en los vehículos pues la capacidad de los vehículos de detenerse o disminuir su velocidad depende completamente del mismo. Aproximadamente el 70% de la energía cinética del vehículo es absorbida y disipada por el freno de disco delanteros mientras que los frenos traseros se encargan del resto de la energía en una situación dinámica, mientras que en la situación estática del vehículo el eje delantero soporta el 55% y el trasero el 45%. Estos sistemas son capaces de cumplir con dicha función ya que su funcionamiento se basa en la fricción (García-León, Díaz, & Solano, 2018, p. 9).

2.1.1 Tipos de sistemas

La función principal del sistema de frenado es la de reducir la velocidad o la de detener el vehículo, dependiendo de la necesidad del conductor, el sistema se encarga de transformar la energía cinética en calor por efecto del rozamiento. El sistema de frenado es capaz de amplificar la fuerza que conductor aplica sobre el pedal de freno y transmitir dicha fuerza a los elementos de fricción (Bauzá Fernández, 2018, p. 5).

Existen diferentes tipos de sistemas que transfieren la fuerza aplicada a los pedales hasta los frenos

2.1.1.1 Sistemas de freno mecánico

Este tipo de sistema igual que todos tiene la función de detener, disminuir la velocidad del vehículo o mantenerlo estático, la particularidad de este consiste en transmitir la fuerza que

se aplica sobre el pedal hacia las zapatas mediante un cable o varilla (Sierra Castro, 2019, p. 31).

Los frenos mecánicos ya no se usan mucho para detener automóviles, aunque la mayoría de los automóviles tienen frenos de emergencia que se activan mecánicamente tal como se muestra en la figura 2.1. Los frenos dinámicos (mecánicos) consisten en un cable o varilla que conecta el pedal del freno a la parte de accionamiento de la zapata del freno (Sierra Castro, 2019, p. 31).

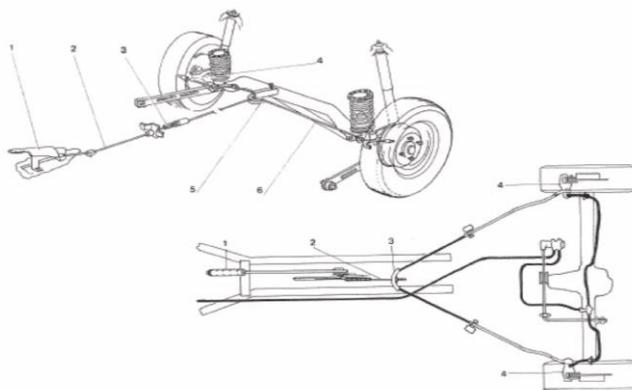


Figura 2.1 Esquema del freno mecánico

Fuente: (Zaragoza, 2001, p. 48)

2.1.1.2 Sistema de freno hidráulico

En el sistema de freno hidráulico el conductor aplica fuerza de empuje sobre el pedal, la cual es multiplicada gracias al servofreno y transmitida al cilindro maestro. En el cilindro maestro la aplicación de la fuerza provoca que se incremente la presión del líquido de frenos. Posteriormente es transmitida mediante cañerías a los cilindros de freno de cada uno de los neumáticos, la presión provoca el desplazamiento de los pistones juntamente con las pastillas de freno o zapatas, dependiendo del tipo de freno. La pastilla al ejercer la presión sobre el disco es capaz de reducir la velocidad de este hasta detenerlo (Cana Anquise, 2018, p. 4).

Al retirar la fuerza sobre el pedal del freno la presión de líquido disminuye, permitiendo así que los resortes de las zapatas se retiren del tambor o disco y permitiéndole retomar su forma natural. El sistema de frenos está equipado con reforzador de vacío, esto se llama un freno de potencia, es un elemento del sistema cuya función es dirigir fluido y a través del circuito hidráulico para la presión y la cantidad requerida para activar el sistema de frenos

dependiendo de las condiciones de manejo de un vehículo con potencia en el pedal (Cana Anquise, 2018, p. 4).

En la tabla 2.1 se muestra cómo varía las presiones al tener servo freno y no tenerlo, la presión del sistema depende directamente de la carga que el conductor aplica sobre el pedal de freno.

Tabla 2.1 Presiones en el circuito con y sin servofreno

Fuerza sobre el pedal (N)	Presión en el circuito con servo (bar)	Presión en el circuito sin servo (bar)
0	0	0
10	30	13
20	65	24
30	104	34
40	118	44
50	130	53
60	140	63
70	150	75
80	160	86
90	170	100
100	180	113

Fuente: (Guerra Morilla, p. 13)

El esquema de este sistema se muestra en la figura 2.2 y las partes que componen el sistema hidráulico según Zaragoza (2001) son:

Servofreno: permite que la fuerza aplicada en el pedal sea incrementada, brindando la misma presión al sistema hidráulico.

Pedal de freno: conformado por una palanca de activación del circuito de freno de servicio, activa la bomba de freno mediante el empujador.

Bomba de freno: es la encargada de suministrar el líquido de frenos con una presión igual en todos los circuitos independientes.

Circuitos: entre los más destacados tenemos el circuito hidráulico con doble circuito en diagonal o en X, en el cual se distribuye por un lado la rueda delantera izquierda con la rueda derecha posterior. Otro tipo de circuito es con doble circuito independiente.

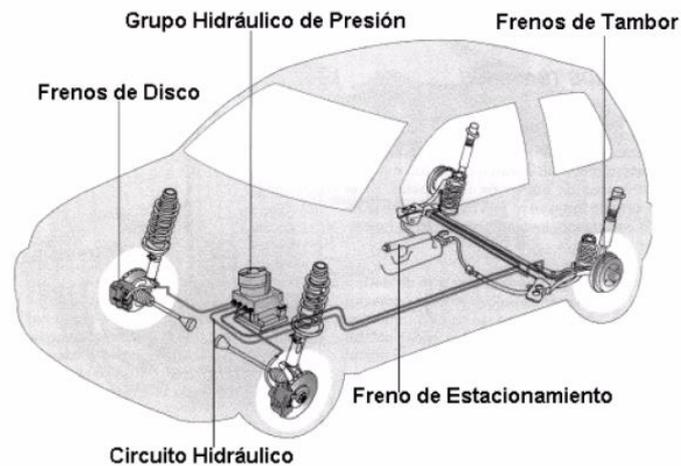


Figura 2.2 Esquema de los circuitos del freno hidráulico

Fuente: (Zaragoza, 2001, p. 18)

2.1.1.3 Sistema de freno neumático

Es un sistema de frenos utilizado principalmente para equipos de transporte pesado, los frenos de aire transmiten potencia utilizando aire comprimido generado por un compresor accionado por el motor del vehículo y un regulador de presión que ayuda a evitar la sobre presión. Cuando se presiona el pedal del freno la válvula del freno se activa lo que permite que el aire comprimido en el depósito fluya hacia la cámara del freno de la rueda, donde se activa la leva, conduciendo el arco hacia el interior del tambor provocando la parada del vehículo. Otra característica del aire comprimido es que es fácil de transportar, se los puede realizar a través de tuberías de aire y el aire después de su uso se devuelve a la atmosfera sin contaminantes (Arellano Rodríguez & Noriega Brito, 2013, p. 7).

El sistema neumático representado en la figura 2.3 está integrado por:

Compresor de aire: se encuentra conectado mediante engranajes o la correa al motor, se enfría mediante aire o por su mismo sistema.

Gobernador del compresor: se encarga de nivelar la presión de aire que entrega el compresor de aire, cuando la presión se eleva a 125 psi se desactiva el gobernador evitando el paso de aire y cuando la presión disminuye a 100 psi se activa nuevamente.

Tanques de almacenamiento: es el encargado de almacenar la presión de aire.

Drenaje del tanque de almacenamiento: permite el drenaje de agua y aceite dentro de los tanques evitando fallas dentro del sistema.

Válvula de seguridad: sistema integrado en los tanques que se activa cuando la presión supera los 150 psi.

Pedal de freno: al ejercer una mayor fuerza sobre el pedal aumentara directamente la presión de aire.

Medidor de presión: son indicadores de la presión existente en los tanques.

Freno de resorte: se activa al presenciar una caída de presión entre 20 y 45 psi.

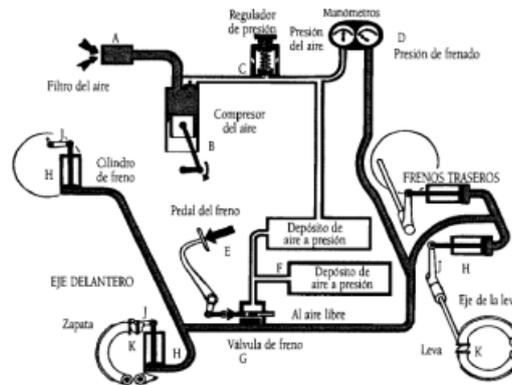


Figura 2.3 Esquema del sistema de freno neumático

Fuente: (Zaragoza, 2001, p. 23)

2.1.2 Tipos de frenos

2.1.2.1 Freno de tambor

Los frenos de tambor llamados frenos de banda en algunos lugares, tienen dos zapatas semicirculares que presionan contra la superficie interna de tambor de metal que gira de forma solidaria la rueda. Las zapatas están montadas en una placa fija llamada también placa trasera o suspensión para que no puedan girar. Cuando el conductor pisa el pedal del freno, la presión hidráulica se acumula en cilindro maestro y se transmite a cada cilindro de las ruedas, donde la presión se acumula y empuja el pistón o bombín juntamente con la zapata. Al entrar en contacto las zapatas con el tambor por acción de la fricción provoca que se detenga el giro de la rueda. En el punto de anclaje generalmente existe un ajuste de freno el cual permite disminuir la distancia entre las zapatas y la superficie interna del tambor a medida que se desgasta el forro adherido a la zapata (Frenos Y Dirección Del Vehículo Anfibio & Muñoz Patricio David, 2015, p.23).

Las principales ventajas del freno de tambor es su fácil reparación ya que son los más comunes, brindan el servicio de freno de mano, sus componentes son fáciles de encontrar y tienen un bajo costo (Zaragoza, 2001, p. 41).

Sus principales desventajas son la numerosa cantidad de partes que lo componen, no presenta un buen sistema de refrigeración por lo cual con el aumento de temperatura genera una dilatación entre el contacto del tambor y la zapata generando una deficiencia en el frenado, es propenso a generar una mayor cantidad de bloqueo de rueda (Zaragoza, 2001, p. 42).

En la figura 2.4 se mostrarán las partes que componen el freno de tambor.

- Cilindro de rueda
- Ajustador
- Placa de respaldo
- Zapata
- Resorte de anclaje
- Balata
- Resorte de retorno
- Tambor

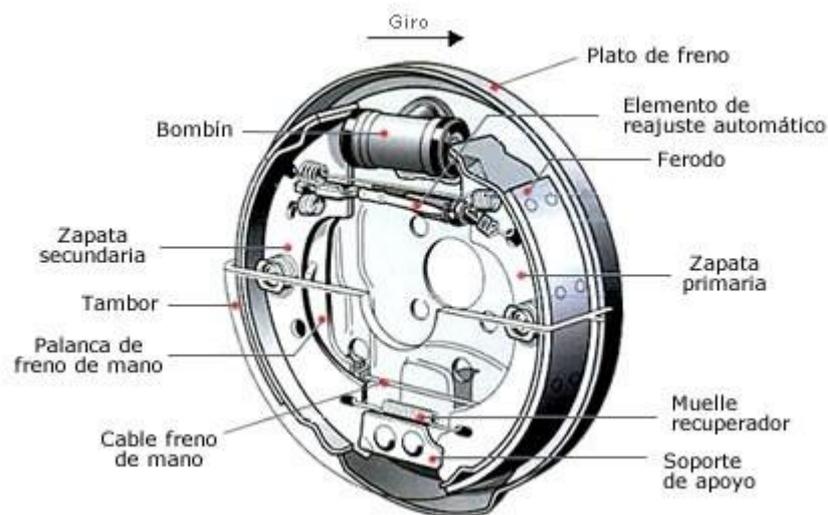


Figura 2.4 Freno de tambor

Fuente: (Álvaro, 2021)

2.1.2.2 Freno de disco

Un freno de disco es un dispositivo cuya función es detener o ralentizar el giro de ruedas. Por lo general son hechos de acero unido a una rueda o eje, para detener las ruedas, cuenta con espaciadores que se presionan mecánica o hidráulicamente contra las llantas del disco. La fricción entre el disco y los bloques hace que la rueda frene. Los discos de freno disipan

el calor más rápido que los tambores porque la superficie del disco está más expuesta a la atmosfera. La forma del disco permite el uso de protectores contra salpicaduras o placa para dirigir el flujo de aire sobre la superficie del disco. El flujo de aire dirigido durante el movimiento del automóvil enfría continuamente los rotores (Lenin, Grefa, Patricio, & Casanova, 2012, p.17).

Una de las principales ventajas de los frenos de disco es la ventilación ya que evita un recalentamiento en el disco que perjudique la eficiencia de frenado. Además, presenta una construcción más sencilla (Zaragoza, 2001, p. 37).

La principal desventaja de este tipo de freno es que necesita de mayor fuerza de frenado, por lo tanto, contar con el servofreno en el sistema es indispensable para detener el vehículo de forma eficiente. El mantenimiento y reparación del sistema es más costoso que el freno de tambor (Zaragoza, 2001, p. 37).

En la figura 2.5 se muestran las partes que componen al freno de disco.

- Pasador
- Pinza de freno
- Purgador
- Ventana de inspección
- Pastilla de freno
- Tornillo para rueda
- Tapa
- Apoyo de la llanta
- Ventilación de disco
- Disco de freno



Figura 2.5 Freno de disco

Fuente: (Mayo, 2019)

2.1.2.3 Tipo de freno más empleado en el mercado ecuatoriano

Según datos de la AEADE acerca de los vehículos comercializados en el Ecuador durante el primer semestre del 2023, se ha identificado los 10 vehículos más comercializados en el país y el tipo de freno que estos emplean.

Tabla 2.2 Diez vehículos más vendidos en Ecuador y tipo de freno que emplean

Unidades vendidas	Porcentaje (%)	Freno delantero	Freno trasero
1061	25,97307222	Disco	Tambor
714	17,47858017	Disco	Disco
564	13,80660955	Disco	Disco
557	13,63525092	Disco	Disco
254	6,217870257	Disco	Disco
249	6,095471236	Disco	Disco
247	6,046511628	Disco	Disco
192	4,700122399	Disco	Disco
127	3,108935129	Disco	Disco
120	2,937576499	Disco	Disco
4085			

En la tabla 2.2 se cuenta con información referente a las unidades comercializadas y el porcentaje de participación en el mercado que representan entre las 10 unidades más vendidas. El 100% de los frenos delanteros son frenos de disco, mientras que para su semejante en las ruedas traseras el freno de disco es ocupado en el 74,03% de las unidades vendidas.

2.2 Pastillas de freno

Cox (2012) establece como punto de partida en el desarrollo de materiales o compuestos tribológicos utilizados en ingeniería al año 1900, cuando Herbert Froad comenzó a trabajar en materiales de fricción. En 1901 obtuvo la patente del uso de zapatas de madera mecanizadas destinadas a utilizarse como frenos de automóviles. En la figura 2.6 se muestra la representación gráfica del invento de Froad, en donde además de las zapatas de madera también se muestran los soportes de metal sobre los cuales se colocaban las primitivas zapatas. El funcionamiento de estos frenos primitivos consistía en que las zapatas eran presionadas contra la superficie de las llantas de caucho hasta detener el vehículo (p. 7).

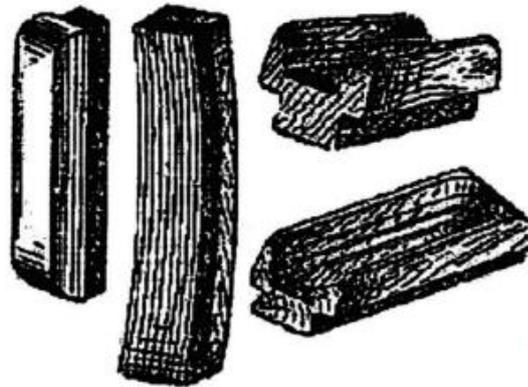


Figura 2.6 Bloques de madera

Fuente: (Cox, 2012, p. 7)

Cox (2012) señala que en el diseño de Froad la zapata de madera utilizada es el material de sacrificio, mientras que la estructura de soporte rígido no sufre daño alguno. El invento de Froad desarrolló permite el reemplazo únicamente del material de fricción y no del sistema completo, característica que se ha mantenido hasta la actualidad con los materiales utilizados en frenos y embragues (p. 8).

2.2.1 Tipos de pastilla de frenos

2.2.1.1 Pastillas de freno orgánicas

Este tipo de pastillas pueden estar construidas con fibras de diversos materiales como: caucho, vidrio, kevlar, carbono o compuestos sin asbesto. Este tipo de pastillas son amigables con el medio ambiente pues no generan grandes niveles de contaminación a medida que van desgastándose, además de ser más blandas y silenciosas (Cano Riancho, 2020, p. 24).

Uno de los principales factores negativos de este tipo de pastillas es su acelerado desgaste. Esta característica no las convierte en una opción ideal para vehículos de carga pesada debido a que este tipo de vehículos hacen un mayor esfuerzo al momento de desacelerar lo que provoca un deterioro aun mayor en las pastillas de freno orgánicas (Cano Riancho, 2020, p. 24).

2.2.1.2 Pastillas de freno semi metálicas

Velasteguí Carrillo (2015) describe que la composición de las pastillas semi metálicas es de aproximadamente 30% a 65% de metal. Algunos de los materiales son la lana de acero, alambre, cobre u otra clase de metales. Estas pastillas se caracterizan por contar con una alta potencia de frenado y un buen coeficiente de disipación de calor (p. 57).

2.2.1.3 Pastillas de freno cerámicas

Este tipo de pastilla es la más eficiente en cuanto a frenado, además de acoplarse a todo tipo de vehículo en diversas condiciones debido a su gran potencia de frenado y disipación de calor, no generan ruido al entrar en contacto con el rotor, reduce los niveles de polvo de desgaste de la pastilla y mejoran los tiempos de frenado (Cano Riancho, 2020, p. 24).

Entre los principales componentes se pueden encontrar materiales como: fibras cerámicas, materiales no ferrosos y pequeñas cantidades de metales. Un limitante de su uso es el precio de dichas pastillas pues son las más caras del mercado (Velasteguí Carrillo, 2015b, p. 63).

2.2.2 Composición de las pastillas de freno

Las pastillas utilizadas en los vehículos se fabrican a base de varios componentes, en la figura 2.7 se muestra la distribución de estos. Los aglomerados o ligantes orgánicos se encargan de asegurar la cohesión de todos los demás componentes, las fibras son el refuerzo a base de amianto, materiales sintéticos, fibras de aramida. Finalmente, las cargas minerales son de tipo metálico permite la resistencia al desgaste y un alto coeficiente de fricción (Yunga Toaquiza & Ocampo Visuma, 2021, p. 10).

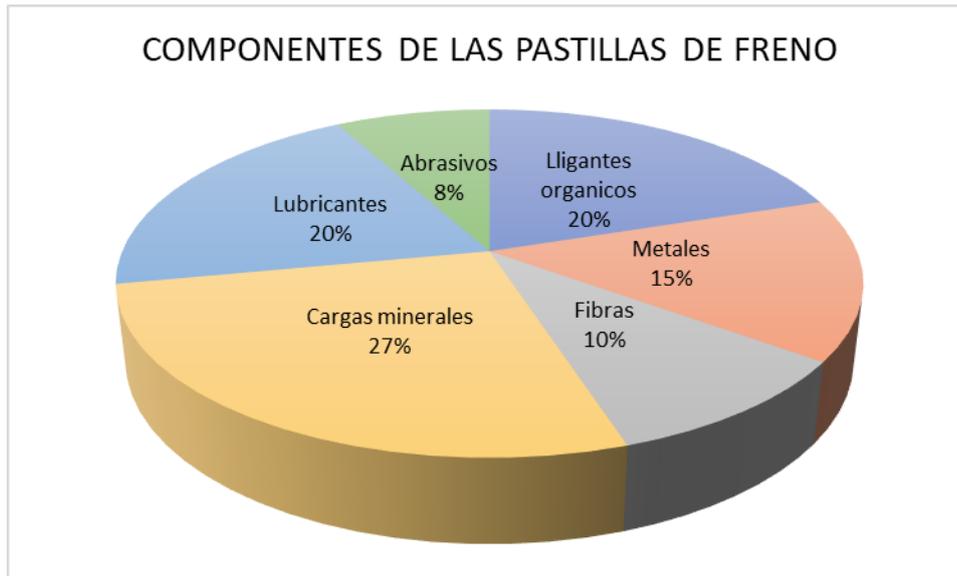


Figura 2.7 Composición de pastillas de freno
Fuente: (Yunga Toaquiza & Ocampo Visuma, 2021, p. 10)

2.2.2.1 Fibras

Las fibras son los elementos responsables de la aglomeración y unión de los demás elementos. En otras palabras, las fibras son el "marco" de las pastillas de freno y mantienen unidos al resto de los elementos mediante múltiples ramas. Hay dos tipos principales de fibras, fibras sintéticas y fibras minerales. Los más comunes en el campo de la fricción son: fibra de vidrio, fibra de aramida, lana de roca (Guerra Morilla, s.f.).

2.2.2.2 Cargas minerales

Las cargas minerales son responsables de la consistencia mecánica general, es decir, proporcionan resistencia al desgaste, resistencia al corte, también son responsables de la resistencia a altas temperaturas. Las cargas minerales más habituales son barita, magnesita, talco, mica, carbonato, feldespato, entre otras (Guerra Morilla, s.f.).

Dentro de las cargas minerales se encuentra el Amianto, este presenta características fisicoquímicas que le permiten tener gran resistencia a las altas temperaturas y a las elevadas tensiones. Cuenta con un punto de fusión superior a 1000° C y una densidad relativa de 2.5 (Cerrada, Martí-Amengual, & Sanz-Gallen, 2020, p.1).

La producción de materiales elaborados a base de amianto se prohibió en España en el año 2001 por una orden ministerial en la cual se evaluaba las desventajas en la salud que generaba

dicho material, pero no fue hasta el 15 de junio de 2002 cuando entró en vigor dicha orden (Cerrada et al., 2020, p.1).

2.2.2.3 Componentes metálicos

Se agregan en forma de polvo o viruta para igualar el coeficiente de fricción y la transferencia de calor de la pastilla de freno a la pinza. Sin embargo, muchos de los componentes de fricción son peligrosos para la salud. Los metales más utilizados en la construcción de pastillas de freno son cobre, latón, bronce entre otros (Guerra Morilla, s.f.).

2.2.2.4 Lubricantes

Llamados también modificadores de coeficiente, son los responsables de variar el coeficiente de fricción disminuyéndolo, dependiendo del cambio de temperatura de funcionamiento. Por lo general estos materiales se los emplea en forma de polvo. Los materiales empleados son: grafitos, coques, sulfuros, antracitas, entre otros (Guerra Morilla, s.f.).

2.2.2.5 Ligantes orgánicos

Este tipo de materiales permiten la aglomeración de los materiales que constituyen la pastilla, cuando alcanza cierta temperatura los componentes se dilatan, fluyen y se combinan entre si hasta polimerizar. Los materiales principalmente empleados son: resinas fenólicas termo endurecibles, diversos tipos de cauchos, ceras, aceites, entre otros (Guerra Morilla, s.f.).

2.2.2.6 Materiales abrasivos

El principal objetivo de este tipo de materiales es el incremento del coeficiente de fricción entre componentes, también permite renovar y limpiar la superficie del disco, ayudando a la formación de una capa intermedia evitando así el desgaste prematuro del disco y la pastilla (Guerra Morilla, s.f.).

2.2.3 Normativa de las pastillas de freno

En la normativa Ecuatoria NTE INEN 2185 como objeto y campo de acción se establecen los requisitos que debe de satisfacer las pastillas de freno y también los ensayos a los cuales se deben someter los materiales de fricción empleados en sistemas de frenos de vehículos.

Siendo aplicable tanto a los revestimientos de frenos y a los ensambles de pastillas como de zapatas (p. 2).

En esta normativa se definen ciertos conceptos tomados literalmente de otra normativa nacional, NTE INEN-ISO 611, en donde se detallan:

- Material de fricción para frenos (revestimiento para freno): Este material se puede obtener a partir de material de fricción proveniente de pastillas de freno, zapata o un bloque, de los que se encuentran disponibles en el mercado.
- Probeta: La probeta deberá fabricarse tomando como una sección cuadrada de 12.65 mm a 12.73 mm, el espesor de la probeta será señalado por el fabricante del equipo de ensayo, Fast.
- Coeficiente de fricción: En la normativa se señalan los diferentes coeficientes de fricción y la letra con la cual los fabricantes las identifican los cuales se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Código de los coeficientes de fricción

Letra del código	Coefficiente de fricción
C	$\mu \leq 0.15$
D	$0.15 \leq \mu \leq 0.25$
E	$0.25 \leq \mu \leq 0.35$
F	$0.35 \leq \mu \leq 0.45$
G	$0.45 \leq \mu \leq 0.55$
H	$0.55 \leq \mu$
Z	Sin clasificación

Fuente: (NTE INEN 2185, p. 2)

Además, detalla el método de ensayo para la determinación de dureza de los materiales, también incluye información acerca del equipo necesario para realizarlo y el procedimiento a llevar a cabo para poder obtener resultados verificables.

2.2.3.1 Comportamiento del coeficiente de fricción (método de ensayo fast)

2.2.3.1.1 Equipo

En la normativa NTE INEN 2185 máquina para el ensayo Fast es útil para determinar el comportamiento del coeficiente de fricción del material. Esta máquina posee un disco el cual cumple las características siguientes (p. 8).

- Diámetro 179.32 mm
- Espesor 38.1 mm
- Dureza Brinell:170 – 220
- Composición química conforme la información presentada en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Composición del material

Elemento	Contenido %	
	Mínimo	Máximo
Carbono	3.3	3.5
Manganeso	0.6	0.9
Silicio	1.8	2.1
Azufre	-	0.12
Fósforo	-	0.15
Níquel	0.60	0.70
Cromo	0.15	0.25
Molibdeno	0.20	0.30

Fuente: (NTE INEN 2185, p. 9)

2.2.3.1.2 Procedimiento

Previo a cada ensayo debe prepararse la superficie del disco con una lija de grano 240 y se termina con lija 320, de esta manera se consigue eliminar cualquier material residuo producto de ensayos anteriores, se culmina la limpieza del equipo con acetona o aceite embebido.

En la probeta es necesario medir su espesor en los cuatro extremos, y determinar el promedio aritmético del espesor inicial.

La probeta debe ser montada en el brazo de la carga, en donde corresponde al centro del disco, el disco de contar con velocidad lineal de 7 m/s, equivalente a 870 rpm. Se regula la presión ejercida sobre la probeta en un valor constante de 5.6 daN/cm², y se ensaya por 90 min.

2.3 Tribología: métodos y ensayos

2.3.1 Fundamentos

Bhushan (2013) detalla que el término “Tribología” es una palabra moderadamente nueva, que vio su nacimiento en un trabajo dirigido por Peter Jost, dicho trabajo estaba direccionado al estudio e investigación sobre la lubricación en Inglaterra. Durante el desarrollo de dicho trabajo se descubrió que no existía un término adecuado, por ello tribología se usó para describir aspectos de lubricación, tecnologías de rodamiento y demás campos de estudio asociados (p. 1).

El término se derivó del griego “tribos” que significa frotar. Por lo tanto, en su nivel más elemental la tribología es un estudio científico de frotar objetos entre sí (Cox, 2012, p. 18). Mientras que Bhushan (2013) lo define como la ciencia y tecnología de dos superficies que interactúan entre sí en movimiento relativo. Aunque suene como algo muy intuitivo e incluso simple, cuando dos objetos se friccionan entre si lo procesos por los cuales estos atraviesas están lejos de ser simples e intuitivos. Durante la fricción entre dos objetos se llevan a cabo una serie de interacciones, las cuales se dividen entre mecánicas y químicas (p. 4).

Cox (2012) describe que las interacciones mecánicas entre las superficies provocan cambios físicos irreversibles en este producto del desprendimiento de material, deformación plástica o incluso adquiriendo material dependiendo del mecanismo de desgaste. Además, el deslizamiento es capaz de provocar cambios químicos en los materiales, pues producto de este se puede generar calor el cual es capaz de cambiar la composición de los materiales o facilitar las reacciones químicas con la atmósfera operativa, típicamente la reacción química es la oxidación y la combustión por la presencia de oxígeno en el aire (p. 18).

Bhushan (2013) describe que la tribología se concentra en estudiar el contacto de objetos móviles, lo cual involucra la transformación de algún tipo de energía. En el caso de frenos la energía cinética, en algún otro tipo de energía, principalmente en energía térmica. Por esta razón la caracterización de tribológica de un material tiene que ver con la adhesión, fricción,

desgaste, lubricación, resistencia al rayado y diseño de superficies que están interactuando (p. 4).

El eje de estudio del presente trabajo es identificar los factores que intervienen en el desgaste de las pastillas de freno y ofrecer un modelo matemático capaz de predecir el mismo.

2.3.2 Mecanismos genéricos de desgaste

2.3.2.1 Desgaste abrasivo

Stachowiak & Batchelor (2013) describen que el desgaste abrasivo ocurre cuando sobre la superficie de un material se aplica carga sobre partículas de un material de igual o mayor dureza que el material de la superficie. El término de desgaste abrasivo hace referencia a diferentes mecanismos de desgaste involucrados que actúan en conjunto, cada uno de los diferentes mecanismos cuenta con características propias (p. 525).

En principio se consideraba que el desgaste abrasivo por granos duros era semejante al corte de máquinas herramientas, sin embargo, un análisis más profundo del desgaste ha demostrado que dicha similitud se consigue únicamente con los granos afilados. Por otra parte, los granos también pueden eliminar material por micro corte, microfractura, extracción de granos o fatiga del material (Stachowiak & Batchelor, 2013, p. 526).

2.3.2.1.1 Micro corte

El desarrollo del microscopio electrónico de barrido, SEM por sus siglas en inglés, permitió observar a más detalle el desgaste abrasivo, revelando dos mecanismos de desgaste básicos: mecanismo de corte y mecanismo de acumulación de cuña o “arado”, siendo el segundo modo menos eficiente que el mecanismo de corte. Posteriormente en los siguientes estudios se identificó que el mecanismo de corte es menos eficiente en cuanto al desprendimiento de material que cuando el desgaste se da por corte y fatiga conjuntamente. La geometría de la partícula también incide en la cantidad de material que se elimina por corte, pues una partícula o grano con bordes fracturado o filosos elimina más material que una partícula con bordes redondeados (Stachowiak & Batchelor, 2013, p. 527).

2.3.2.1.2 Fractura

Stachowiak & Batchelor (2013) describen que al realizar un ensayo de desgaste abrasivo en un material frágil transparente se forman grietas por debajo de la superficie que ha estado en contacto con los granos. En dicha observación se encontraron tres modos de

agrietamiento: grietas de ventilación que se propagan a 30° de la superficie, fragmentación localizada y una grieta mediana profunda. El sucesivo paso continuo de los granos a través de la superficie repercutirá en la generación de mas grietas y finalmente resultando en la liberación de grandes cantidades del material (p. 528).

2.3.2.1.3 Fatiga

El paso de los grano o partículas provoca el desplazamiento y deformación del material hacia los laterales del área de la superficie en contacto. La deformación repentina provocará la fractura del material, este mecanismo de desgaste es lento u necesita constantes repeticiones (Stachowiak & Batchelor, 2013, p. 528).

2.3.2.1.4 Extracción de granos

Este tipo de mecanismo de desgaste es relativamente raro, principalmente se da en materiales cerámicos. En este mecanismo se da el desprendimiento del material cuando la unión entre los granos es débil y los granos que componen la superficie son grandes.

2.3.2.2 Desgaste erosivo

Stachowiak & Batchelor (2013) describen que el desgaste erosivo ocurre cuando partículas sólidas o líquidas impactan contra la superficie de un objeto, este es un tipo de desgaste típico en bombas o turbinas. Los mecanismos que intervienen en el desgaste erosivo son el material de la partícula que impacta, el ángulo de impacto, la velocidad de impacto y el tamaño de la partícula (p. 551).

2.3.2.3 Desgaste adhesivo

Bhushan (2013) explica que el desgaste adhesivo se provoca cuando dos superficies planas se encuentran en contacto y también existe un movimiento de deslizamiento entre ellas, dichas superficies pueden estar o no lubricadas. La unión entre las dos superficies se da por las asperezas existentes en ambas superficies y fruto del contacto se dan desprendimientos de partículas en ambos materiales y uniéndose a la otra superficie o también daría lugar a la formación de partículas sueltas (p. 316).

2.3.2.4 Desgaste por cavitación

Stachowiak & Batchelor (2013) señalan que el desgaste por cavitación es frecuente en turbinas y hélices, se caracteriza por la formación de hoyos en la superficie del material. Este fenómeno se da por la formación de burbujas en los líquidos producto de que se obtengan

presiones igual a 0 dentro de los sistemas. El contacto de las hélices o turbinas con las burbujas provoca una aceleración en cuanto al movimiento y al entrar el contacto con el líquido las hélices desaceleran, este proceso genera estrés en el material y finalmente desgastándolo (p. 567).

2.3.2.5 Desgaste químico

Bhushan (2013) describe que el desgaste corrosivo ocurre cuando el deslizamiento entre dos superficies se da en un ambiente corrosivo, por ejemplo, en el aire existe la presencia del oxígeno, un elemento capaz de oxidar las superficies de los metales. La formación de corrosión en la superficie del material sirve como una capa protectora, ya que al formarse una capa la corrosión avanza de manera menos eficaz hacia el interior del material, sin embargo, cuando existen superficies en contacto la capa exterior de corrosión puede desprenderse generando que el resto del material también sufra corrosión (p.359).

2.3.3 Ensayos

2.3.3.1 Ensayo de impacto o péndulo de Charpy

Este ensayo es útil para calcular la tenacidad de un material al impacto. Este ensayo se encuentra regulado por la norma ASTM E-23, en la cual se encuentra información de cómo realizar el ensayo, además del tamaño de los distintos tipos de probeta. Para realizar este ensayo se utiliza una probeta de tamaño pequeño, esta probeta debe colocarse en el yunque donde será sujetado en los extremos, vale la pena indicar que la probeta cuenta con un ranurado en la zona media, en esta zona se dará la ruptura del material cuando se libere el martillo y choque contra la probeta (Norma ASTM E23, s/f, p. 151). En la figura 2.8 muestra la representación tanto del péndulo de Charpy como la probeta ranurada.

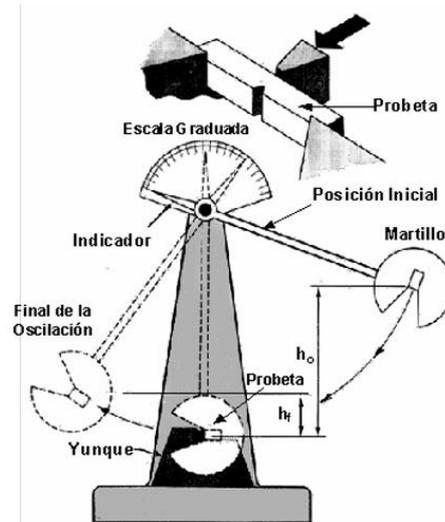


Figura 2.8 Péndulo de Charpy

Fuente: (Normativa ASTM E23, p. 161)

Al finalizar el ensayo el indicador indicará sobre la escala G graduada la cantidad de energía que la probeta ha absorbido antes de romperse.

2.3.3.2 Ensayo pin on disk

Este ensayo se encuentra normado por la ASTM G-99, en la cual se encuentran los parámetros para realizar el ensayo, de igual forma que las dimensiones de las probetas. La máquina es construida acorde esquema de la figura 2.9, consta de un disco giratorio y de un perno el cual se quedará estático sobre el disco. El procedimiento del ensayo consiste en que se debe presionar el perno con una carga específica sobre el disco giratorio, y con el transcurso del tiempo se dará una pérdida de material, lo que se conoce como tasa de desgaste, esta pérdida de material se dará tanto en el perno como en el disco.

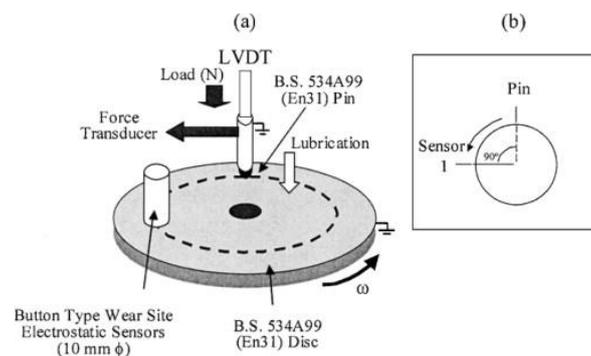


Figura 2.9 Pin on disk diagrama

Fuente: (Normativa ASTM G 99, 2000)

Del ensayo realizado en la maquina pin on disk, es posible obtener algunas características del material, como, por ejemplo

- Calcular el coeficiente de rozamiento entre los materiales analizados, por las fuerzas tangenciales y normal, la fuerza normal se determina ya que en esta máquina se puede medir la fuerza con la que se aplica el perno sobre el disco (“Norma Astm g99, 2000).
- Permite estudiar cómo se da el desgaste entre dos materiales (materiales cerámicos, polímeros, cerámicos y recubiertos) (“Norma Astm g99, 2000).
- Evaluar cómo cambia la tasa de desgaste cuando se aplican líquidos sobre las superficies en rozamiento (“Norma Astm g99, 2000).

2.3.3.3 Ensayo de abrasión por medio de arena seca

Este ensayo se encuentra normado por ASTM G-65, consiste en estudiar el desgaste producido por las partículas al introducirse entre dos superficies, que se encuentran en contacto mutuo. Las partículas entre las dos superficies generarán una deformación plástica severa de tipo superficial y subsuperficial. Los principales componentes del equipo utilizado para realizar este ensayo son la tolva, la boquilla de paso para la arena seca, una rueda de acero recubierta con caucho vulcanizado, el disco girara en el mismo sentido en el que cae la arena seca, además también cuenta con una porta probeta y un motor.

Para realizar el ensayo se debe encender el motor que hará girar el disco en la misma dirección en la que fluye la arena. Con una fuerza constante se presionará la probeta contra la rueda gracias a la acción de una palanca (ASTM G 65, 2010, p. 2).

2.3.3.4 Ensayo de dureza Brinell

Santos y Yenque (2001) afirman que J. A. Brinell propuso su metodo para determinar la dureza de los metales en 1900 durante el desarrollo del Congreso de la “Asociacion Internacional para el ensayo de materiales”. Este metodo consiste en aplicar y comprimir una bola de acero muy duro sobre una superficie plana y lisa, durante un tiempo determinado de tal forma que se obtenga una impresión en la superficie del material a evaluar. A partir de la huella dejada en el material se deben medir el diametro de la huella y al dividir por la carga aplicada se puede obtener la dureza (p. 74).

Para realizar el ensayo se debe tomar en cuenta algunas consideraciones, como: la bola del indentador que se utiliza puede ser de acero o de carburo de tungsteno dependiendo de la dureza del material a ensayar, además el tamaño de la bola dependerá del espesor de la probeta sobre la cual se realizará el ensayo tal como se muestra en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Tamaño de la bola del indentador

Espesor de la probeta (mm)	Diámetro de la bola, D (mm)
Mayor de 6 mm	10
Entre 3 y 6 mm	5
Menor de 3 mm	25
	1.25
	0.625

Fuente: (Santos, Yenque D, Rojas L., & Rosales U., 2001, p. 75)

Una vez se ha determinado el diámetro de la bola a utilizar, se debe determinar cuanta carga se aplicará sobre el material. Para realizar el ensayo se debe ir aplicando carga poco a poco hasta alcanzar la carga calculada para el material, luego se deberá mantener dicha carga por una cantidad determinada de tiempo, según el tipo de material ensayado (Santos, Yenque D, Rojas L., & Rosales U., 2001, p. 74).

El valor de la carga, P, se obtiene mediante la formula: $P = K * D^2$, siendo D el diámetro de la bola indentadora seleccionada y K una constante propia de cada material. Al igual que la contante K, el tiempo de duración del ensayo, t, dependerá de cada material de la probeta a ensayar. Para calcular la dureza del material se procede a medir la huella del diámetro dejada por el indentador, y conociendo el valor de la carga, P, el valor de la dureza se obtiene por la siguiente formula: $HB = \frac{P}{S}$

Finalmente, simplificando la formula se obtiene la ecuación 2.1.

$$HB = \frac{2P}{\pi * D * (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad [2.1]$$

Donde,

P es la carga aplicada sobre la probeta

D es el diámetro de la bola, se encuentra en mm

d es el diámetro de la huella dejada en la superficie por la bola

2.3.4 Temperatura en el sistema de freno

El sistema de freno para poder detener el vehículo transforma en calor la energía asociada al movimiento del vehículo, dicha transformación repercutirá en el incremento de la temperatura tanto del disco de freno como de la pastilla de freno.

2.3.4.1 Temperatura en pastillas y disco de freno

En el estudio de García & Sánchez (2017) enfocado en el análisis del comportamiento en el contacto entre el disco de freno y las pastillas determinan que la temperatura del sistema se incrementa de acuerdo con el incremento de la presión entre ambos elementos. Además de que los resultados en el estudio del flujo de calor demuestran que las temperaturas producto del contacto de disco y pastillas es capaz de alcanzar temperaturas entre 300°C y 800°C, el calor del sistema es absorbido y disipado mayormente por el disco dado que la pastilla de freno cuenta con una conductividad térmica menor que el disco (p. 84).

2.3.4.2 Temperatura como factor que interviene en la eficiencia de frenado

Paludi (2018) realizó ensayos para determinar la influencia de la temperatura en la distancia de frenado de un automóvil Chevrolet Corsa. El ensayo consistía en realizar 20 frenadas a partir de una velocidad media de 40 km/h controlando la temperatura de los frenos. En los 10 primeros ensayos la temperatura de los frenos se encontraba entre 25° y 35°C, mientras que para los restantes 10 ensayos la temperatura se encontraba entre 45° y 60°C. La distancia media de frenado para la primera condición de los ensayos fue de 10,52 m, mientras que para los ensayos realizados a 45° - 65°C la distancia de frenado fue de 11,75 m, implicando un incremento del 11,79% en la distancia de frenado (p. 22).

Una explicación al fenómeno descrito por Paludi (2018) es el cambio en el coeficiente de fricción de las pastillas de freno, sin embargo según Méndez Torres & Muñoz Llivichuzhca (2017) los frenos pueden cambiar su coeficiente de fricción cuando alcanzan temperaturas entre 350° - 400°C, con una variación apenas del 10% en el coeficiente de fricción (p. 33).

2.3.4.3 Cristalización de las pastillas de freno

Méndez Torres & Muñoz Llivichuzhca (2017) indica que cuando las pastillas están sometidas a temperaturas superiores a los 400°C por el constante uso de los frenos durante el descenso de montañas pronunciadas o durante la conducción deportiva, los frenos sufren

el fenómeno de cristalización. La cristalización se provoca porque las altas temperaturas queman los compuestos orgánicos de las pastillas de freno, pasando a estado líquido y carbonizándose por completo para finalmente producir una película superficial fina y brillante, dicha película tienen un coeficiente de fricción menor a una pastilla en buen estado lo cual repercute directamente en la eficiencia del sistema de frenado (p. 23).

CAPÍTULO III

3 MARCO METODOLÓGICO

3.1 Normativa ASTM G-65

La normativa define los procedimientos para que los laboratorios puedan determinar la resistencia de los materiales mediante el ensayo de desgaste abrasivo, la existencia de esta normativa permite la repetitividad de los experimentos y la validación de los datos obtenidos. La información en cuanto a pérdida de material por normativa siempre debe representarse la pérdida de volumen en mm³.

3.1.1 Equipo de prueba

En la figura 3.1 se tiene la representación del equipo para este ensayo, planteando la estandarización del diseño y construcción del equipo. En el diseño es posible identificar que la máquina está compuesta por una tolva, utilizada para almacenar la arena de Ottawa y dirigirla hacia la boquilla, un porta muestras unido al brazo de palanca y el disco de acero con un recubrimiento de caucho, dentro del diseño también se incluye un motor de 1 hp, encargado de proveer del torque al disco (Normativa ASTM G 65, 2010, p. 2).

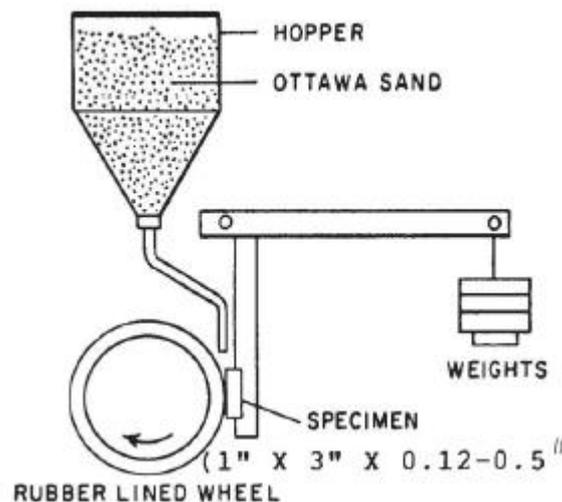


Figura 3.1 Diagrama esquemático del equipo de pruebas

Fuente: (Normativa ASTM G 65, p. 2)

3.1.1.1 Rueda de caucho

La rueda de caucho consistirá en un disco de acero el cual cuenta con una capa exterior de caucho de clorobutílo de dureza shore A-60. Este disco tendrá un diámetro de 9" o 228.6

mm incluyendo la capa exterior de caucho la cual debe tener un grosor de 0.5" o 12.7 mm, el disco se considerará apto para su uso en este ensayo siempre que el diámetro del disco en total no sea menor a 8.5" o 215.9 mm, y una vez alcance este diámetro deberá colocarse un nuevo recubrimiento de caucho (ASTM G-65, 2010, p. 4).

3.1.1.2 Abrasivo

El abrasivo utilizado en estos ensayos debe ser una arena de grano de cuarzo redondeado indicado por AFS 50/70 Test Sand, el contenido de humedad de la arena no debe representar más del 0,5 % del peso, ya que valores mayores podría llevar a obtener datos de desgaste incorrectos, de igual manera el usar múltiples veces la arena en las pruebas podría llevar a cambiar los resultados de las pruebas (ASTM G-65, 2010, p. 5).

3.1.1.3 Boquilla de arena

Para la construcción de la boquilla debe de tomarse en cuenta que la normativa exige una tasa de flujo laminar de arena entre 300 a 400 g/min, para cumplir este requisito la normativa añade el diseño de la boquilla. La longitud de la boquilla puede adaptarse al diseño particular de cada equipo, siempre y cuando se garantice la conexión a la tolva y el flujo directo de la arena hacia la probeta y el disco de acero (ASTM G-65, 2010, p. 6).

En las figuras 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5 se puede observar las dimensiones propuestas por la normativa para la construcción de la boquilla a fin de garantizar el flujo indicado, todas las dimensiones se encuentran en mm.

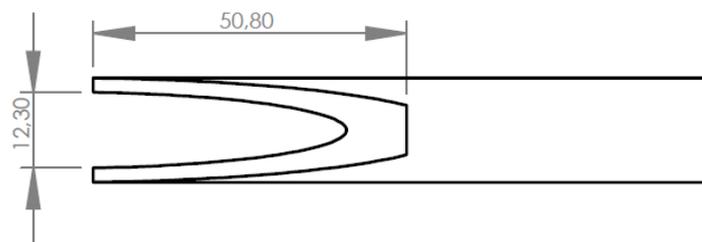


Figura 3.2 Dimensiones pieza 1, vista superior
Fuente: (Normativa ASTM G 65, 2010, p. 6)

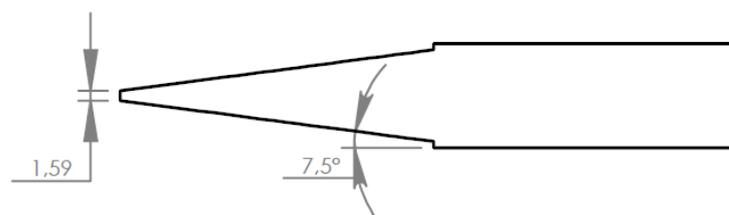


Figura 3.3 Dimensiones pieza 1 de la boquilla, vista lateral

Fuente: (Normativa ASTM G 65, 2010, p. 6)

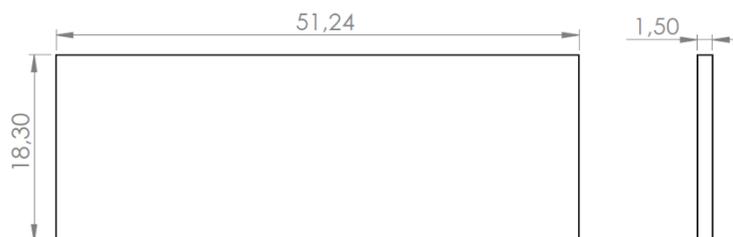


Figura 3.4 Dimensiones pieza 3 y 4 de la boquilla

Fuente: (Normativa ASTM G 65, 2010, p. 6)

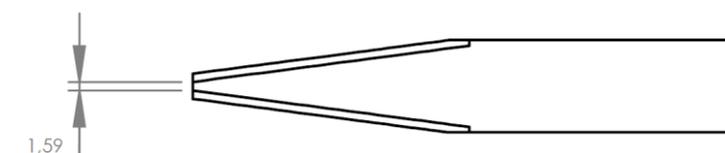


Figura 3.5 Boquilla ensamblada

Fuente: (Normativa ASTM G 65, 2010, p. 6)

3.1.1.4 Porta muestras y brazo de palanca

El porta muestras se encuentra unido a la palanca donde se colocan los pesos, de manera que se consigue aplicar la fuerza adecuada contra la rueda.

3.1.1.5 Preparación de la muestra

Este ensayo permite realizar pruebas de abrasión a cualquier tipo de material, incluyendo materiales forjados, piezas fundidas, capas de soldadura eléctrica, metales en polvo, metalización, cerámica, etc.

Según la Normativa ASTM G-65 las probetas que se utilizan en este tipo de ensayo deben tener una forma rectangular de 25x76 mm y el ancho puede variar entre 3,2 y 12,7 mm (p. 5)

3.1.1.6 Parámetros de prueba

En la norma ASTM G-65 se encuentran detallados cinco distintos procedimientos, los cuales se pueden aplicar según la resistencia a la abrasión de cada material, en la tabla 3.1 se detallan los distintos procedimientos (p. 8).

Tabla 3.1 Parámetros de ensayo

Parámetros de ensayo				
Procedimiento	Carga	Tiempo	Rotación del disco	Abrasión lineal

	N	Lb	min	RPM	Total Rev.	m	ft
A	130	30	30	200	6000	4309	14138
B	130	30	10	200	2000	1436	4711
C	130	30	0,5	200	100	71,8	236
D	45	10,1	30	200	6000	4309	14138
E	130	30	5	200	1000	718	2360

Fuente: (Normativa ASTM G 65, 2010, p. 8)

3.1.1.6.1 Procedimiento A

Es la prueba más severa clasificada dentro de la normativa ASTM G-65, y permite la clasificación de los materiales metálicos en una amplia escala de pérdida de volumen yendo desde baja hasta extrema resistencia a la abrasión. Debido a su duración resulta especialmente útil para la clasificación de materiales con resistencia a la abrasión media a extrema (p. 1).

3.1.1.6.2 Procedimiento B

El presente procedimiento se trata de una variación a corto plazo del procedimiento A, útil para materiales cuya resistencia a la abrasión pueda clasificarse entre media y baja. Este procedimiento es resulta apto a utilizarse cuando los valores de pérdida de volumen en el procedimiento A exceden los 100 mm³.

3.1.1.6.3 Procedimiento C

Variación del procedimiento "A" a muy corto plazo, utilizado específicamente para recubrimientos delgados.

3.1.1.6.4 Procedimiento D

Variación del procedimiento A en cuanto a la aplicación de una carga más liviana, resulta útil para clasificar a materiales de baja resistencia a la abrasión.

3.1.1.6.5 Procedimiento E

Variación a corto plazo del procedimiento B, el cual resulta útil para clasificar a los materiales cuya resistencia se encuentre entre media o baja.

3.2 Ensayo

3.2.1 Cálculo de las masas en las pesas

Tomando en cuenta que el variar la carga aplicada sobre la probeta incidirá en el comportamiento del desgaste abrasivo, se hace necesario realizar diferentes ensayos e identificar cual es dicho cambio de comportamiento dentro del modelo matemático.

3.2.1.1 Diagrama del cuerpo libre del brazo de palanca

En la figura 3.6 es posible identificar en el diagrama del cuerpo libre del equipo de desgaste fabricado por Álvarez Dayana y Narváez Pablo en 2020.

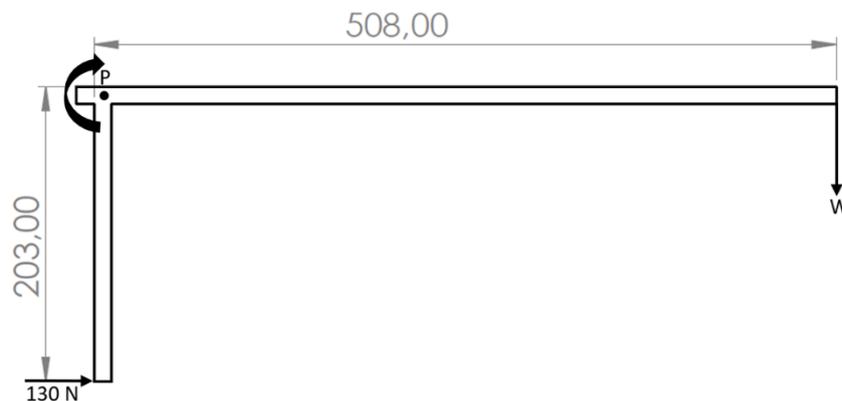


Figura 3.6 Diagrama de cuerpo libre para el cálculo de esfuerzos

Fuente: (Álvarez Mejía & Narváez Simbaña, 2020, p. 31)

El diagrama previamente presentado resultará útil para calcular las diferentes cargas que se aplicará sobre la probeta. Una de las cargas utilizadas será de 130 N según lo detalla la normativa en su procedimiento C, las tres cargas extra a utilizar será de 90 N, 110 N y 150 N.

3.2.1.2 Cálculos

Para calcular la carga que se van a aplicar es necesario realizar una sumatoria de momentos en el punto P.

3.2.1.2.1 Carga de 130 N

$$\sum M_P = 0$$

$$(W \times 508 \text{ mm}) - (130 \text{ N} \times 203 \text{ mm}) = 0$$

$$(W \times 508 \text{ mm}) = (130 \text{ N} \times 203 \text{ mm})$$

$$W = \frac{26390 \text{ N} * \text{mm}}{508 \text{ mm}}$$

$$W = 51.95 \text{ N}$$

Una vez se ha determinado la carga, es posible identificar cual es la masa necesaria para que tener la carga la calculada.

$$W = m \times g$$

$$m = \frac{51.95 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

$$m = 5.30 \text{ kg}$$

3.2.1.2.2 Carga de 90 N

$$\sum M_P = 0$$

$$(W \times 508 \text{ mm}) - (90 \text{ N} \times 203 \text{ mm}) = 0$$

$$(W \times 508 \text{ mm}) = (90 \text{ N} \times 203 \text{ mm})$$

$$W = \frac{18270 \text{ N} * \text{mm}}{508 \text{ mm}}$$

$$W = 35.965 \text{ N}$$

Una vez se ha determinado la carga, es posible identificar cual es la masa necesaria para que tener la carga la calculada.

$$W = m \times g$$

$$m = \frac{35.965 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

$$m = 3.666 \text{ kg}$$

3.2.1.2.3 Carga de 110 N

$$\sum M_P = 0$$

$$(W \times 508 \text{ mm}) - (110 \text{ N} \times 203 \text{ mm}) = 0$$

$$(W \times 508 \text{ mm}) = (110 \text{ N} \times 203 \text{ mm})$$

$$W = \frac{22330 \text{ N} * \text{mm}}{508 \text{ mm}}$$

$$W = 43.96 \text{ N}$$

Una vez se ha determinado la carga, es posible identificar cual es la masa necesaria para que tener la carga la calculada.

$$W = m \times g$$

$$m = \frac{43.96 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

$$m = 4.48 \text{ kg}$$

3.2.1.2.4 Carga de 150 N

$$\sum M_P = 0$$

$$(W \times 508 \text{ mm}) - (150 \text{ N} \times 203 \text{ mm}) = 0$$

$$(W \times 508 \text{ mm}) = (150 \text{ N} \times 203 \text{ mm})$$

$$W = \frac{30450 \text{ N} * \text{mm}}{508 \text{ mm}}$$

$$W = 59.94 \text{ N}$$

Una vez se ha determinado la carga, es posible identificar cual es la masa necesaria para que tener la carga la calculada.

$$W = m \times g$$

$$m = \frac{59.94 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

$$m = 6.11 \text{ kg}$$

3.2.2 Procedimiento del ensayo

3.2.2.1 Procedimiento escogido

En la normativa ASTM G-65 se indica que el procedimiento B resulta útil para determinar la resistencia a la abrasión para materiales con de alta a baja resistencia, adecuado para los materiales en los cuales el presente trabajo se desarrollará, sin embargo por la necesidad de obtener datos de desgaste en relación al tiempo el procedimiento más adecuado es el procedimiento C, el cual se realiza por 30 segundos y con una carga de 130 N, sin embargo este procedimiento se repetirá 20 veces sobre la misma probeta a fin de identificar como sería el comportamiento de desgaste si se realizara el ensayo señalado en el procedimiento B.

3.2.2.2 Procedimiento de funcionamiento

1. Fabricación de las probetas según las regulaciones de la normativa.
2. Limpiar las probetas retirando cualquier partícula extraña o tipo de suciedad.
3. Utilizando una balanza analítica, con exactitud de 0.001 g, pesar las probetas
4. Colocar el peso adecuado en el brazo.
5. Colocar la probeta en el porta-probetas y realizar un ajuste correcto.
6. Programar el variador de frecuencia del motor en 66.66 Hertz y encender el motor.
7. Verificar que la velocidad del disco sea de 200 RPM en la pantalla incluida en el equipo de pruebas.
8. Abrir la llave, permitiendo el paso de la arena de Ottawa y verificar que caiga a un flujo constante y laminar.
9. Bajar el conjunto de brazo y porta-probetas, de forma que la probeta entre en contacto con el disco y la arena.
10. Controlar el tiempo del ensayo, de forma que el ensayo se realice por únicamente 30 segundos.
11. Levantar el conjunto brazo y porta-probetas, terminando con el contacto entre la probeta y el disco.
12. Detener el flujo de arena y apagar el motor.
13. Pesar la probeta, y registrar los datos obtenidos en cuanto a desgaste

3.3 Construcción del modelo matemático

Al observar fenómenos físicos es posible identificar que ciertas características o variables se comportan de forma similar conforme dichos fenómenos se van repitiendo, este comportamiento constante permite que se establezcan teorías que explican cuáles son las relaciones entre las variables.

Young (2009) afirma que las teorías pueden ser planteadas mediante modelos, estos se tratan de la versión simplificada de un fenómeno físico. Si se tomaran en cuenta todas las variables que intervienen en un fenómeno físico se dificultaría el análisis, por ello se hace necesario ignorar ciertas condiciones para facilitar el entendimiento del fenómeno y analizar su comportamiento de la forma más cercana a la realidad (p. 3).

Existen dos formas en las cuales las variables que intervienen en un fenómeno puedan estar relacionadas, estas son determinísticas y no determinísticas. Devore (2012) explica que cuando la relación entre las variables está marcada por algún comportamiento teórico ya conocido e identificado son variables con relación determinística (p. 468). Mientras que Montgomery (2003) describe que cuando no se conocen la relación entre dos o más variables que intervienen en el comportamiento de un fenómeno se tiene variables con relación no determinística, y para modelar dicho comportamiento es necesario realizarlo de forma empírica (p. 431).

3.3.1 Modelos empíricos

En el presente trabajo se construirá un modelo matemático capaz de describir el desgaste de pastillas de freno en el tiempo. Para conseguir este objetivo se obtendrán datos de desgaste en el tiempo mediante el ensayo descrito por la normativa ASTM G-65 y se determinará la relación existente entre el desgaste sufrido por las probetas y el tiempo que se ha aplicada la carga para producir desgaste sobre los materiales estudiados. Con el fin de determinar dicha relación se realizará un análisis de regresión según menciona Montgomery (2003) es una herramienta estadística para modelar e investigar la relación existente entre dos o más variables (p. 431), Devore (2012) añade que esta relación es utilizada para aquellas variables cuya relación no es determinística (p. 469).

3.3.1.1 Modelo de regresión

En el procedimiento descrito por Devore (2012) se hace necesario identificar las variables que van a intervenir en el modelamiento del fenómeno escogido, por lo tanto, se determina como la X a la variable cuyo valor es fijo y como Y a la variable cuyo valor resulta incierto (p. 469). Para el caso particular de este trabajo se determina al tiempo de desgaste como la variable X, mientras que la cantidad de material que las probetas han perdido se le determina como variable Y. Durante las observaciones del ensayo se deberá determinar por cada valor de la variable independiente x_1, x_2, \dots, x_n un valor de la variable incierta o dependiente Y con la cual se busca su relación. Con los datos obtenidos se conformarán n pares $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$, empleados para construir los diagramas de dispersión, útiles para determinar la naturaleza de la relación existente entre los datos. En la tabla 3.2 se tiene los valores obtenidos experimentalmente y en la figura 3.7 el comportamiento que tienen los valores de desgaste.

Tabla 3.2 Valores de desgaste experimentales con 90 N de carga

90 N		
Número de observación (i)	Tiempo (s) x	Desgaste de la probeta (g) y
1	0	0
2	30	0,297
3	60	0,557
4	90	0,735
5	120	0,944
6	150	1,186
7	180	1,384
8	210	1,555
9	240	1,738
10	270	1,937
11	300	2,127
12	330	2,304
13	360	2,509
14	390	2,678
15	420	2,832
16	450	2,974
17	480	3,119
18	510	3,247
19	540	3,36
20	570	3,461

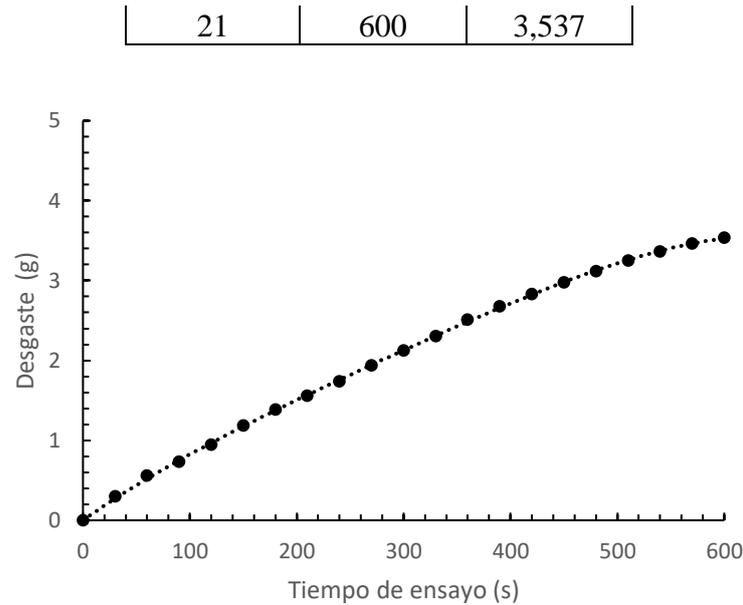


Figura 3.7 Diagrama de dispersión del desgaste de la probeta en el tiempo

Utilizando el software Excel se ha graficado el diagrama de dispersión y también se ha graficado la línea de tendencia de los valores experimentales. Se ha deducido que el grado de la función que mejor describe el comportamiento de este fenómeno es el 4to. Por lo tanto, el valor medio de la variable aleatoria W se relaciona con la variable “ t ” mediante la siguiente relación polinómica:

$$E(W|t) = \mu_{W|t} = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3 + \beta_4 t^4 \quad [3.1]$$

La ecuación 3.1 representa los valores medios de W por cada t , sin embargo, el valor real de W observado no se encuentra necesariamente sobre la curva determinada por la ecuación. Para generalizar el modelo probabilístico se hace necesario entender que para obtener el valor real de W es necesario que a cada valor fijo de t le corresponda el valor W obtenido por el modelo más un término de error, llegando finalmente a la ecuación 3.2

$$\widehat{W} = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3 + \beta_4 t^4 + \varepsilon \quad [3.2]$$

“donde ε representa el error aleatorio con media cero y varianza σ^2 ” (Montgomery & Runger, 2003).

3.3.1.1.1 Estimación de los parámetros mediante mínimos cuadrados

Devore (2012) señala que en la mayoría de las ocasiones se desconocerá los valores β_i ($i=1,2,3, \dots, n$), pero que si cuenta con los valores obtenidos en las observaciones que se utilizarán para la construcción del modelo (p. 477). Cada observación de W_i será independiente, el error aleatorio es $\varepsilon_i = W_i - \widehat{W}_i$ según lo indica Rodríguez (2007) el valor

de ε_i también será independiente por cada valor de i . Esto sugiere que el método de mínimos cuadrados es el adecuado para realizar las estimaciones de los parámetros β_i , el uso de este método ayudará a determinar los valores que mejor se ajusten al comportamiento de los valores observados (p. 296).

Rodríguez (2007) propone el siguiente procedimiento para utilizar el método de mínimos cuadrados (p. 297).

1. En primera instancia es necesario determinar la suma de los cuadrados del error o SCE

$$SCE = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (W_i - \widehat{W}_i)^2$$

$$SCE = \sum_{i=1}^n (W_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 t_i - \hat{\beta}_2 t_i^2 - \hat{\beta}_3 t_i^3 - \hat{\beta}_4 t_i^4)^2 \quad [3.3]$$

En la ecuación 3.3 se determina que SCE es una función que cuenta con 5 variables:

$$\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3, \hat{\beta}_4$$

2. Posteriormente se debe derivar SCE para cada una de sus variables e igualar a 0

$$\frac{dSCE}{d\beta_0} = 0, \frac{dSCE}{d\beta_1} = 0, \frac{dSCE}{d\beta_2} = 0, \frac{dSCE}{d\beta_3} = 0, \frac{dSCE}{d\beta_4} = 0, \frac{dSCE}{d\beta_5} = 0$$

3. Después de haber derivado SCE para cada parámetro, igualar a cero y simplificar se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones

$$\hat{\beta}_0 n + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n t_i + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n t_i^2 + \hat{\beta}_3 \sum_{i=1}^n t_i^3 + \hat{\beta}_4 \sum_{i=1}^n t_i^4 = \sum_{i=1}^n W_i$$

$$\hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^n t_i + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n t_i^2 + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n t_i^3 + \hat{\beta}_3 \sum_{i=1}^n t_i^4 + \hat{\beta}_4 \sum_{i=1}^n t_i^5 = \sum_{i=1}^n t_i W_i$$

$$\hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^n t_i^2 + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n t_i^3 + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n t_i^4 + \hat{\beta}_3 \sum_{i=1}^n t_i^5 + \hat{\beta}_4 \sum_{i=1}^n t_i^6 = \sum_{i=1}^n t_i^2 W_i$$

$$\hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^n t_i^3 + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n t_i^4 + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n t_i^5 + \hat{\beta}_3 \sum_{i=1}^n t_i^6 + \hat{\beta}_4 \sum_{i=1}^n t_i^7 = \sum_{i=1}^n t_i^3 W_i$$

$$\hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^n t_i^4 + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n t_i^5 + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n t_i^6 + \hat{\beta}_3 \sum_{i=1}^n t_i^7 + \hat{\beta}_4 \sum_{i=1}^n t_i^8 = \sum_{i=1}^n t_i^4 W_i$$

4. Con las ecuaciones normales construidas, se procede a resolver el sistema mediante el método de ecuaciones matriciales de algebra lineal, la ecuación 3.4 describe al sistema:

$$A * \beta = H \quad [3.4]$$

Donde:

$$A = \begin{pmatrix} n & \sum_{i=1}^n t_i & \sum_{i=1}^n t_i^2 & \sum_{i=1}^n t_i^3 & \sum_{i=1}^n t_i^4 \\ \sum_{i=1}^n t_i & \sum_{i=1}^n t_i^2 & \sum_{i=1}^n t_i^3 & \sum_{i=1}^n t_i^4 & \sum_{i=1}^n t_i^5 \\ \sum_{i=1}^n t_i^2 & \sum_{i=1}^n t_i^3 & \sum_{i=1}^n t_i^4 & \sum_{i=1}^n t_i^5 & \sum_{i=1}^n t_i^6 \\ \sum_{i=1}^n t_i^3 & \sum_{i=1}^n t_i^4 & \sum_{i=1}^n t_i^5 & \sum_{i=1}^n t_i^6 & \sum_{i=1}^n t_i^7 \\ \sum_{i=1}^n t_i^4 & \sum_{i=1}^n t_i^5 & \sum_{i=1}^n t_i^6 & \sum_{i=1}^n t_i^7 & \sum_{i=1}^n t_i^8 \end{pmatrix} \quad \beta = \begin{pmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \hat{\beta}_3 \\ \hat{\beta}_4 \end{pmatrix}$$

$$H = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n W_i \\ \sum_{i=1}^n t_i W_i \\ \sum_{i=1}^n t_i^2 W_i \\ \sum_{i=1}^n t_i^3 W_i \\ \sum_{i=1}^n t_i^4 W_i \end{pmatrix}$$

Montgomery (2003) señala que la matriz A nace de $T^T * T$, siendo T^T la matriz transpuesta de la matriz X, mientras que la matriz H surge de la operación $T^T * W$ (p. 490).

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 30 & 900 & 27000 & 810000 \\ 1 & 60 & 3600 & 216000 & 12960000 \\ 1 & 90 & 8100 & 729000 & 65610000 \\ 1 & 120 & 14400 & 1728000 & 207360000 \\ 1 & 150 & 22500 & 3375000 & 506250000 \\ 1 & 180 & 32400 & 5832000 & 1049760000 \\ 1 & 210 & 44100 & 9261000 & 1944810000 \\ 1 & 240 & 57600 & 13824000 & 3317760000 \\ 1 & 270 & 72900 & 19683000 & 5314410000 \\ 1 & 300 & 90000 & 27000000 & 8100000000 \\ 1 & 330 & 108900 & 35937000 & 1,1859E + 10 \\ 1 & 360 & 129600 & 46656000 & 1,6796E + 10 \\ 1 & 390 & 152100 & 59319000 & 2,3134E + 10 \\ 1 & 420 & 176400 & 74088000 & 3,1117E + 10 \\ 1 & 450 & 202500 & 91125000 & 4,1006E + 10 \\ 1 & 480 & 230400 & 110592000 & 5,3084E + 10 \\ 1 & 510 & 260100 & 132651000 & 6,7652E + 10 \\ 1 & 540 & 291600 & 157464000 & 8,5031E + 10 \\ 1 & 570 & 324900 & 185193000 & 1,0556E + 11 \\ 1 & 600 & 360000 & 216000000 & 1,296E + 11 \end{pmatrix}, W = \begin{pmatrix} 0 \\ 0,297 \\ 0,577 \\ 0,735 \\ 0,944 \\ 1,186 \\ 1,384 \\ 1,555 \\ 1,738 \\ 1,937 \\ 2,127 \\ 2,304 \\ 2,509 \\ 2,678 \\ 2,832 \\ 2,974 \\ 3,119 \\ 3,247 \\ 3,36 \\ 3,461 \\ 3,537 \end{pmatrix}$$

Por lo tanto, la matriz $T^T * T$ o A es

$$A = T^T * T$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 0 & 30 & \dots & 600 \\ 0 & 900 & \dots & 360000 \\ 0 & 27000 & \dots & 216000000 \\ 0 & 810000 & \dots & 1,296E + 11 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 30 & 900 & 27000 & 810000 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 600 & 360000 & 216000000 & 1,296E + 11 \end{pmatrix}$$

$$A = T^T * T$$

$$= \begin{pmatrix} 21 & 6300 & 2583000 & 1190700000 & 5,85359E + 11 \\ 6300 & 2583000 & 1190700000 & 5,85359E + 11 & 2,99699E + 14 \\ 2583000 & 1190700000 & 5,85359E + 11 & 2,99699E + 14 & 1,57796E + 17 \\ 1190700000 & 5,85359E + 11 & 2,99699E + 14 & 1,57796E + 17 & 8,47963E + 19 \\ 5,85359E + 11 & 2,99699E + 14 & 1,57796E + 17 & 8,47963E + 19 & 4,62818E + 22 \end{pmatrix}$$

Mientras que la matriz $T^T W$ o H es

$$H = T^T * W = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 0 & 30 & \dots & 600 \\ 0 & 900 & \dots & 360000 \\ 0 & 27000 & \dots & 216000000 \\ 0 & 810000 & \dots & 1,296E + 11 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0,297 \\ \vdots \\ 3,537 \end{pmatrix}$$

$$H = T^T * W = \begin{pmatrix} 42,481 \\ 16851,72 \\ 7620600,6 \\ 3697567812 \\ 1,8748E + 12 \end{pmatrix}$$

Finalmente, las estimaciones de los mínimos cuadrados es posible obtenerla mediante la ecuación 3.5.

$$\hat{\beta} = A^{-1}H \quad [3.5]$$

$$\begin{pmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \hat{\beta}_3 \\ \hat{\beta}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 21 & 6300 & 2583000 & 1190700000 & 5,85359E + 11 \\ 6300 & 2583000 & 1190700000 & 5,85359E + 11 & 2,99699E + 14 \\ 2583000 & 1190700000 & 5,85359E + 11 & 2,99699E + 14 & 1,57796E + 17 \\ 1190700000 & 5,85359E + 11 & 2,99699E + 14 & 1,57796E + 17 & 8,47963E + 19 \\ 5,85359E + 11 & 2,99699E + 14 & 1,57796E + 17 & 8,47963E + 19 & 4,62818E + 22 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 42,481 \\ 16851,72 \\ 7620600,6 \\ 3697567812 \\ 1,8748E + 12 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \hat{\beta}_3 \\ \hat{\beta}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,021225372 \\ 0,009008382 \\ -1,22635E - 05 \\ 2,60172E - 08 \\ -2,39503E - 11 \end{pmatrix}$$

Con los coeficientes calculados se expresa en la ecuación 3.6 el modelo de desgaste polinómico propuesto

$$\hat{W} = 0,02131022 + 0,01757958t - 0,000102016t^2 + 3,0362E - 07t^3 - 2,63711E - 10t^4 \quad [3.6]$$

5. Con el modelo de regresión construido es posible predecir los valores de desgaste de la probeta correspondientes a distintos valores de tiempo de ensayo, esto implica que por cada valor de t_i se obtendrá un valor de \widehat{W}_i . Al contar con valores de \widehat{W}_i y de W_i es posible calcular los residuales en cada punto de observación y construir la tabla 3.3 correspondiente a los errores entre los valores experimentales y los valores obtenidos mediante el modelamiento.

Tabla 3.3 Error del modelo con respecto a los datos experimentales

Número de observación (i)	W_i	W_i	$\varepsilon = W_i - \widehat{W}_i$
1	0	0,021225372	-0,021225372
2	0,297	0,281122718	0,015877282
3	0,557	0,522888922	0,034111078
4	0,735	0,750040374	-0,015040374
5	0,944	0,965627873	-0,021627873
6	1,186	1,172236621	0,013763379
7	1,384	1,37198623	0,01201377
8	1,555	1,566530719	-0,011530719
9	1,738	1,757058513	-0,019058513
10	1,937	1,944292443	-0,007292443
11	2,127	2,128489749	-0,001489749
12	2,304	2,309442076	-0,005442076
13	2,509	2,486475477	0,022524523
14	2,678	2,658450413	0,019549587
15	2,832	2,823761749	0,008238251
16	2,974	2,98033876	-0,00633876
17	3,119	3,125645126	-0,006645126
18	3,247	3,256678934	-0,009678934
19	3,36	3,369972679	-0,009972679
20	3,461	3,461593262	-0,000593262
21	3,537	3,527141991	0,009858009

3.3.1.1.2 Estimación de σ^2

Devore, (2012) determina al parámetro σ^2 como la variabilidad de los datos observados con el modelo de regresión. Si σ^2 fuera un valor muy grande, indicaría que los valores de las mediciones son muy dispersos a la gráfica del modelo de regresión, mientras que si el valor de σ^2 es bajo implicará que los valores reales son muy cercanos a los calculados (p. 481). Además, Montgomery (2003) establece que el error aleatorio ε_i son valores con media 0 y con varianza σ^2 (p. 504).

Se puede calcular σ^2 en términos de la sumatoria de los cuadrados de los residuales, ya que Montgomery (1996) demuestra que $SSE = \hat{\sigma}^2 * (n - p)$, donde n es el número de observaciones y p representa el número de incógnitas en las ecuaciones normales previamente obtenidas (p. 505). Por lo tanto, la varianza se calcula mediante la ecuación 3.7.

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{SSE}{n - p} \quad [3.7]$$

La varianza para el caso específico del presente trabajo es:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{SSE}{n - p}$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

$$SSE = 0,004807523$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{0,004807523}{21 - 5} = 0,00030047$$

3.4 Cálculo de las áreas de contacto y presiones sobre la probeta

Para estimar el área de contacto entre la probeta y el disco recubierto se hará uso del software CAD SolidWorks. En primera instancia se medirá el largo de la huella dejada en la probeta después de los ensayos, la medida de esa distancia se utilizará para trazar una cuerda en la circunferencia de radio igual a la del disco recubierto tal como se muestra en la figura 3.8.

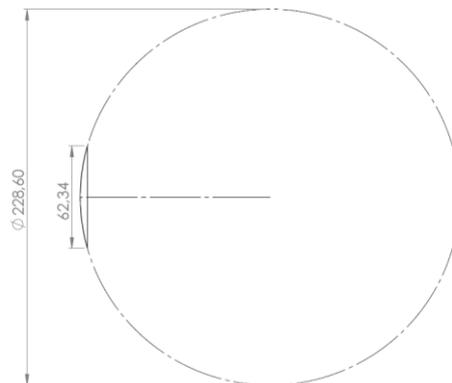


Figura 3.8 Cuerda en la circunferencia del disco recubierto

Posteriormente se corta el resto de la circunferencia y se conserva el arco y la cuerda, con dicho conjunto se extruirá con un ancho de 5 mm obteniendo así una representación en tercera dimensión del volumen que el disco recubierto a desgastado y penetrado sobre la probeta. Finalmente, gracias a SolidWorks es posible conocer el volumen de la pieza trazada, este se compara con el volumen perdido experimentalmente para verificar si la distancia de la cuerda es la adecuada.

3.4.1 Cálculo del área de contacto

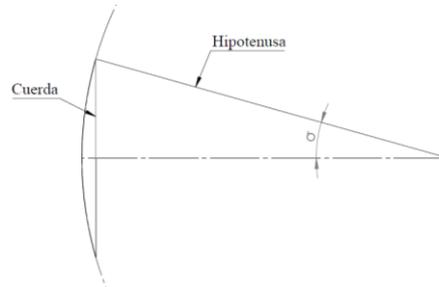


Figura 3.9 Triángulo rectángulo de la circunferencia

Para calcular la longitud del arco se trazará un triángulo rectángulo tal como se muestra en la figura 3.9, la longitud de la hipotenusa corresponde al radio de la circunferencia y la longitud del cateto opuesto al ángulo σ corresponde a la mitad de la longitud de la cuerda. Para calcular el ángulo σ se utilizará la ecuación 3.8.

$$\sigma = \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{Cateto Opuesto}}{\text{Hipotenusa}} \right) \quad [3.8]$$

Finalmente, el arco se calcula utilizando la ecuación 3.9.

$$\text{Arco} = r * (2 * \sigma) \quad [3.9]$$

El área de contacto estaría definida por el producto de la longitud del arco como la altura y el ancho del disco como la base del rectángulo.

3.4.2 Cálculo de la presión sobre la probeta

Es posible calcular la presión que el disco recubierto ejerce sobre la probeta en cada tramo de ensayo una vez que se conoce como han cambiado las áreas de contacto entre el disco y la probeta. Calcular la presión resulta sencillo pues en todo momento se conoce de la carga aplicada y posterior a los cálculos también se conoce el área de contacto, por lo tanto, la presión se obtiene con la ecuación 3.10.

$$P = \frac{F_{\text{Aplicada}}}{\text{Área}_{\text{contacto}}} \quad [3.10]$$

CAPITULO IV

4 RESULTADOS Y ANALISIS

4.1 Ensayos

Para garantizar la fiabilidad de los datos obtenidos mediante los ensayos planteados por la normativa ASTM G-65, es necesario verificar si el equipo a utilizar cumple con los requisitos planteados por la normativa, de igual manera es necesario especificar las medidas de las probetas que serán utilizadas.

4.1.1 Comprobación del flujo de arena

Es necesario comprobar que el flujo de arena sea acorde a lo detallado en la normativa ASTM G-65. Para ello se ha abierto el paso de la boquilla y se ha permitido que la arena caiga por un minuto, es necesario realizar una inspección visual para comprobar que existe un flujo laminar y constante de la arena durante el tiempo de prueba, al finalizar el minuto se debe pesar cuanta arena ha pasado a través de la boquilla, se considera un flujo adecuado si durante ese minuto la cantidad de arena que ha caído se encuentra entre 300 y 400 gramos.

Tabla 4.1 Resultados de las pruebas de flujo de arena

Prueba	Tiempo (min)	Valor real (g)	Valor Nominal (g)	Resultado
1	1	266.355	300 - 400	Incorrecto
2	1	352.625	300 - 400	Correcto
3	1	360.788	300 - 400	Correcto
4	1	315.156	300 - 400	Correcto

En la tabla 4.1 se evidencia que el valor de la primera prueba se encuentra por debajo de los límites establecidos por la normativa, Para remediar este inconveniente fue necesario retirar la boquilla y retirar toda suciedad que impida el correcto flujo de la arena, posteriormente en las siguientes pruebas se evidencia que el flujo de arena es más adecuado.

4.1.2 Comprobación del disco recubierto

De igual manera se debe verificar el estado del disco, así como del recubrimiento sobre el disco, se considerará apto para los ensayos si el diámetro del disco, incluyendo el recubrimiento, no sea menor o igual a 203.2 mm o 8 pulgadas.

4.1.3 Comprobación del rpm del motor

Para los diferentes procedimientos detallados en la normativa ASTM G-65, se establece que el disco debe girar a 200 RPM y según detalla Álvarez (2020) se debe programar el variador de frecuencia en 66.66 Hertz, para conseguir la velocidad deseada en el motor. La velocidad se verificará en la pantalla LCD incluida en el equipo. En la tabla 4.2 se observa que los valores de velocidad del motor son todos correctos acorde a lo establecido en la normativa.

Tabla 4.2 Resultados de las pruebas en la velocidad del disco

Prueba	Tiempo (min)	Valor nominal (rpm)	Valor real (rpm)	Resultado
1	1	200±10	199	Correcto
2	1	200±10	198	Correcto
3	1	200±10	199	Correcto
4	1	200±10	199	Correcto

4.1.4 Preparación de las probetas

En el equipo se realizará el ensayo de desgaste sobre materiales utilizados para la construcción de pastillas de freno, para ser aptos para aplicar los ensayos deben tener la forma que se indica en la normativa. Las probetas deben tener forma rectangular y tener un largo de 75 mm y un ancho de 25 mm, el grosor puede variar entre 3 mm y 12 mm.

En la tabla 4.3 se detallan las dimensiones de las diferentes probetas a utilizar para el presente estudio.

Tabla 4.3 Dimensiones de las probetas

Probeta	Largo	Ancho	Grosor
Amianto	75 mm	25 mm	6 mm
Cerámica	75 mm	25 mm	8 mm

4.1.5 Resultados de los ensayos

Durante el desarrollo del capítulo 3 se especificó que el ensayo estará basado en el procedimiento C establecido en la normativa, que consiste en aplicar 130 N y el ensayo se realizará durante 30 segundos únicamente. Por cada material se han realizado cuatro probetas semejantes, que se identifican por 1, 2, 3 y 4. A cada una de las probetas se ha realizado 20 ensayos consecutivos de desgaste a fin de obtener información de como varía el desgaste de las probetas conforme el ensayo avanza.

Tabla 4.4 Masa de las probetas de amianto por cada intervalo de ensayo

Peso de las probetas (g)				
AMIANTO				
Tiempo (s)	1 (90 N)	2 (110 N)	3 (130N)	4 (150N)
0	26,12	27,001	28,346	26,204
30	25,823	26,674	27,901	25,691
60	25,563	26,369	27,584	25,324
90	25,385	26,121	27,307	25,021
120	25,176	25,893	27,069	24,706
150	24,934	25,692	26,844	24,422
180	24,736	25,413	26,639	24,147
210	24,565	25,261	26,412	23,835
240	24,382	25,057	26,162	23,565
270	24,183	24,931	25,882	23,342
300	23,993	24,707	25,654	23,112
330	23,816	24,477	25,461	22,895
360	23,611	24,177	25,233	22,67
390	23,442	24,056	25,076	22,493
420	23,288	23,893	24,813	22,308
450	23,146	23,591	24,681	22,134
480	23,001	23,373	24,433	21,966
510	22,873	23,199	24,246	21,8552
540	22,76	22,998	24,095	21,735
570	22,659	22,889	23,979	21,635

600	22,583	22,826	23,873	21,556
-----	--------	--------	--------	--------

Tabla 4.5 Masa de las probetas cerámicas por cada intervalo de ensayo

Peso de las probetas (g)				
Cerámicas				
Tiempo (s)	1 (90 N)	2 (110 N)	3 (130N)	4 (150N)
0	40,366	46,713	46,548	41,02
30	40,033	46,213	45,975	40,434
60	39,749	45,939	45,621	39,999
90	39,516	45,641	45,329	39,639
120	39,32	45,403	45,005	39,294
150	39,085	45,115	44,781	38,976
180	38,873	44,952	44,626	38,69
210	38,669	44,76	44,399	38,398
240	38,474	44,627	44,231	38,14
270	38,294	44,508	44,087	37,897
300	38,083	44,343	43,964	37,68
330	37,941	44,234	43,838	37,487
360	37,803	44,115	43,691	37,29
390	37,645	43,939	43,541	37,094
420	37,533	43,752	43,407	36,898
450	37,444	43,61	43,257	36,703
480	37,328	43,464	43,008	36,549
510	37,209	43,315	42,795	36,415
540	37,109	43,152	42,598	36,301
570	37,029	42,965	42,438	36,169
600	36,964	42,839	42,218	36,062

Como se muestra en las tablas 4.4 y 4.5, se ha realizado cuatro ensayos basados en el procedimiento C, sin embargo, en cada uno se ha variado la carga aplicada para identificar como varía el comportamiento del desgaste en función de la carga aplicada.

A continuación, se construyen las tablas de la pérdida de masa de cada material por cada intervalo de tiempo, utilizando la siguiente formula: $W_i = P_1 - P_i$, donde W_i representa el material perdido hasta ese instante y P_i representa el peso de la probeta.

Tabla 4.6 Masa perdida por las probetas de amianto en cada intervalo de ensayo

Masa perdida por las probetas (g)				
AMIANTO				
Tiempo (s)	1 (90 N)	2 (110 N)	3 (130N)	4 (150N)
0	0	0	0	0
30	0,297	0,327	0,445	0,513
60	0,557	0,632	0,762	0,88

90	0,735	0,88	1,039	1,183
120	0,944	1,108	1,277	1,498
150	1,186	1,309	1,502	1,782
180	1,384	1,588	1,707	2,057
210	1,555	1,74	1,934	2,369
240	1,738	1,944	2,184	2,639
270	1,937	2,07	2,464	2,862
300	2,127	2,294	2,692	3,092
330	2,304	2,524	2,885	3,309
360	2,509	2,824	3,113	3,534
390	2,678	2,945	3,27	3,711
420	2,832	3,108	3,533	3,896
450	2,974	3,41	3,665	4,07
480	3,119	3,628	3,913	4,238
510	3,247	3,802	4,1	4,3488
540	3,36	4,003	4,251	4,469
570	3,461	4,112	4,367	4,569
600	3,537	4,175	4,473	4,648

Tabla 4.7 Masa perdida por las probetas cerámicas en cada intervalo de ensayo

Masa perdida por las probetas (g)				
Cerámicas				
Tiempo (s)	1 (90 N)	2 (110 N)	3 (130N)	4 (150N)
0	0	0	0	0
30	0,333	0,5	0,573	0,586
60	0,617	0,774	0,927	1,021
90	0,85	1,072	1,219	1,381
120	1,046	1,31	1,543	1,726
150	1,281	1,598	1,767	2,044
180	1,493	1,761	1,922	2,33
210	1,697	1,953	2,149	2,622
240	1,892	2,086	2,317	2,88
270	2,072	2,205	2,461	3,123
300	2,283	2,37	2,584	3,34
330	2,425	2,479	2,71	3,533
360	2,563	2,598	2,857	3,73
390	2,721	2,774	3,007	3,926
420	2,833	2,961	3,141	4,122
450	2,922	3,103	3,291	4,317
480	3,038	3,249	3,54	4,471
510	3,157	3,398	3,753	4,605
540	3,257	3,561	3,95	4,719
570	3,337	3,748	4,11	4,851
600	3,402	3,874	4,33	4,958

Con la información presentada en las tablas 4.6 y 4.7, se construyen gráficos donde se identifica el comportamiento del desgaste de las probetas dependiendo de la carga aplicada sobre las probetas.

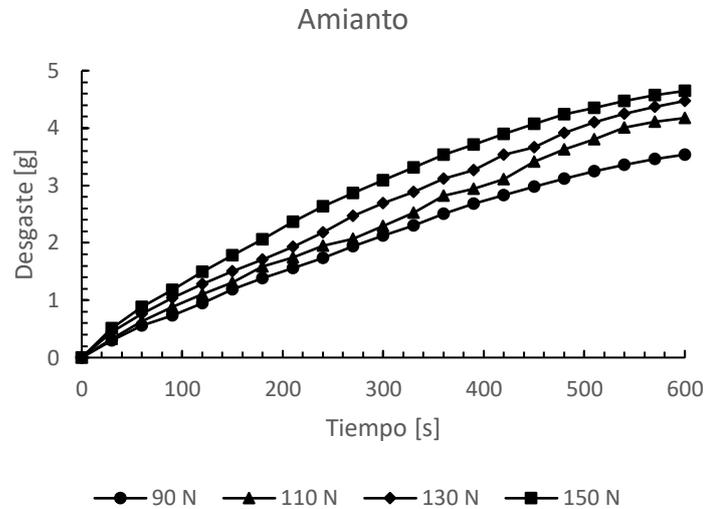


Figura 4.1 Comportamiento del desgaste de las probetas de amianto en el tiempo

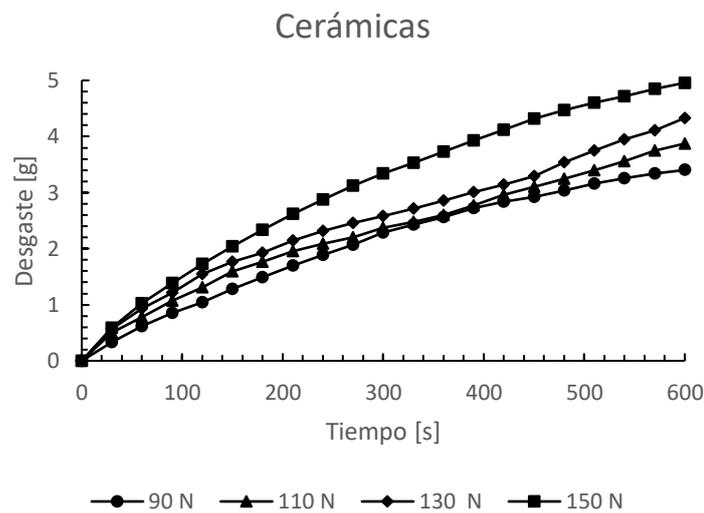


Figura 4.2 Comportamiento del desgaste de las probetas cerámicas en el tiempo

Con la información obtenida en las tablas 4.6 y 4.7, se ha construido las figuras 4.1 y 4.2, con lo que es posible identificar el comportamiento de desgaste de las diferentes probetas, se destaca que a mayor carga aplicada mayor será el desgaste sufrido en las probetas.

Si se comparan los datos en cuanto a pérdida de material por cada uno de los estados de carga aplicados sobre la probeta con el estado de carga de 130 N al completar los 600 segundos, se obtiene el siguiente comportamiento, a 90 N de carga implicó la reducción de

20.93% de la pérdida de material, para la carga de 110 N la pérdida de material fue 6.66 % menor y para 150 N de carga la cantidad de material perdido fue de 3.91% mayor.

Para poder analizar el desgaste de una mejor manera se analizará la variación del desgaste en el tiempo. Para ello se aplicará el concepto de derivada con los datos. Con lo cual se obtiene la figura 4.3.

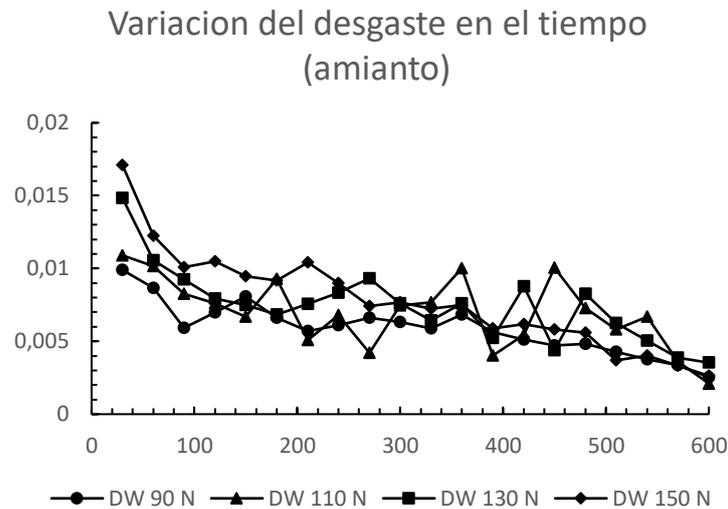


Figura 4.3 Variación del desgaste en las probetas de amianto por cada intervalo de ensayo

En principio la figura 4.3 muestra que durante los primeros instantes de los ensayos se da la mayor pérdida de material en las probetas, conforme el ensayo se desarrolla la tasa de desgaste por unidad de tiempo es menor, al final del ensayo con la carga de 130 N la cantidad de material perdido por unidad de tiempo es 76.18% menor que al principio. Esta reducción en cuanto al material perdido por unidad de tiempo se explica ya que conforme el ensayo se desarrolla, mayor área del disco se encuentra en contacto con la probeta. El cambio en el área de contacto repercute en que la presión ejercida irá disminuyendo, siendo esta la causa por la cual cada vez las probetas pierden menos material.

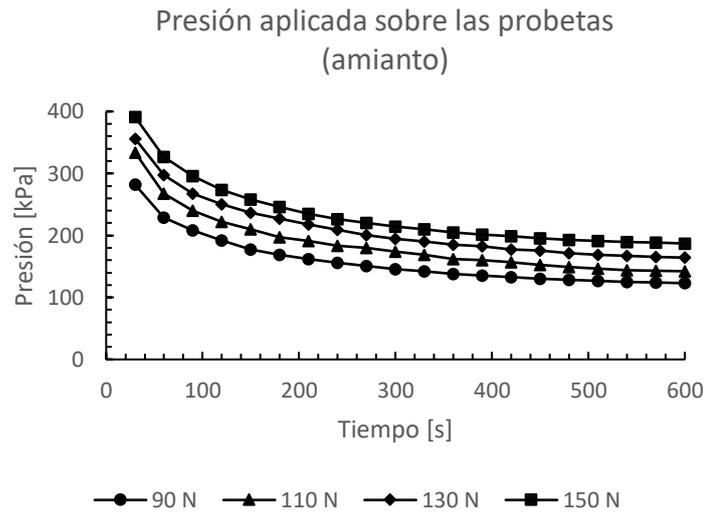


Figura 4.4 Presión aplicada sobre las probetas en el tiempo

En la figura 4.4 se muestra la presión que se ejerce sobre las probetas de amianto durante las diferentes etapas del ensayo. En los primeros 30 segundos del ensayo la probeta sobre la cual se aplican 130 N de carga tiene una presión media de 356.22 kPa y durante el último lapso de ensayo de 30 segundos la presión sobre la misma probeta cae a 164.23 kPa, implicando una caída del 53.89% de la presión ejercida sobre la probeta.

4.2 Modelamiento

En el capítulo 3 se explica el método utilizado para la construcción del modelo matemático, si bien en dicho capítulo se realiza la regresión directamente sobre los valores experimentales, en el presente capítulo se aplicará el método de regresión sobre la derivada de los valores experimentales y posteriormente se integrarán los modelos para obtener las ecuaciones finales.

4.2.1 Modelamiento para el desgaste en amianto con carga de 90 N

A partir de los datos del Anexo I se determina la ecuación 4.1, representa la derivada del desgaste con respecto al tiempo

$$W' = -1.13E - 10t^3 + 1.03E - 07t^2 - 3.45E - 5t + 1.01E - 02 \quad [4.1]$$

Para obtener la ecuación 4.2, la cual describe el comportamiento del desgaste, es necesario integrar la ecuación 4.1, considerando que el comportamiento del desgaste pasa por el punto P (0,0)

$$W = -2,825E - 11t^4 + 3,43333E - 08t^3 - 1,73E - 05t^2 + 0,01t \quad [4.2]$$

Utilizando el mismo procedimiento se han calculado los coeficientes de los modelos específicos para cada estado de carga. La ecuación 4.3 es la representación general de los modelos polinómicos para el desgaste en amianto, los coeficientes que permiten construir los modelos específicos de desgaste según la carga aplicada sobre las probetas se encuentran en la tabla 4.8.

$$W = a_4 * t^4 + a_3 * t^3 + a_2 * t^2 + a_1 * t \quad [4.3]$$

Tabla 4.8 Coeficientes de desgaste (amianto)

	Cargas aplicadas		
Coeficientes	110 N	130 N	150 N
a_4	-7,225E-11	-6,30E-11	-3,95E-11
a_3	9,1E-08	8,30E-08	5,50E-08
a_2	-3,90E-05	-3,97E-05	-3,32E-05
a_1	0,0132	0,015	0,0164

La ecuación 4.4 corresponde al modelo general que describe el comportamiento de desgaste de las probetas de material cerámico, para construir los modelos específicos según la carga aplicada se tienen los coeficientes en la tabla 4.9.

$$W = b_4 * t^4 + b_3 * t^3 + b_2 * t^2 + b_1 * t \quad [4.4]$$

Tabla 4.9 Coeficientes de desgaste (cerámica)

	Cargas aplicadas			
Coeficientes	90 N	110 N	130 N	150 N
b_4	-1,45E-11	-5,68E-11	-6,58E-11	-4,90E-11
b_3	2,16E-08	9,23E-08	1,13E-07	7,53E-07
b_2	-1,65E-05	-5,30E-05	-6,60E-05	-4,71E-05
b_1	0,0109	0,0172	0,0203	0,0199

En la figura 4.5 se compara el comportamiento de los valores experimentales con los valores obtenidos por el modelo polinómico propuesto.

90 N AMIANTO

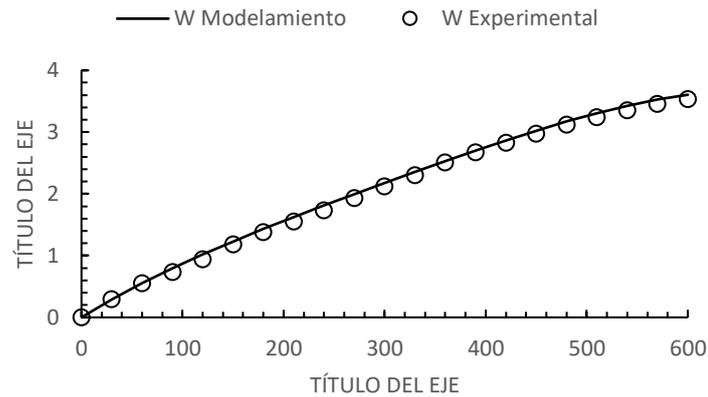


Figura 4.5 Comparación del modelo con los valores experimentales

El modelo propuesto describe con mucha exactitud el comportamiento de los valores experimentales, sin embargo, únicamente resulta útil en el rango de 0 a 600 segundos ya que al intentar obtener valores más allá del rango los valores de desgaste calculados por el modelo polinómico se alejan de los valores que se podrían obtener experimentalmente.

90 N Amianto

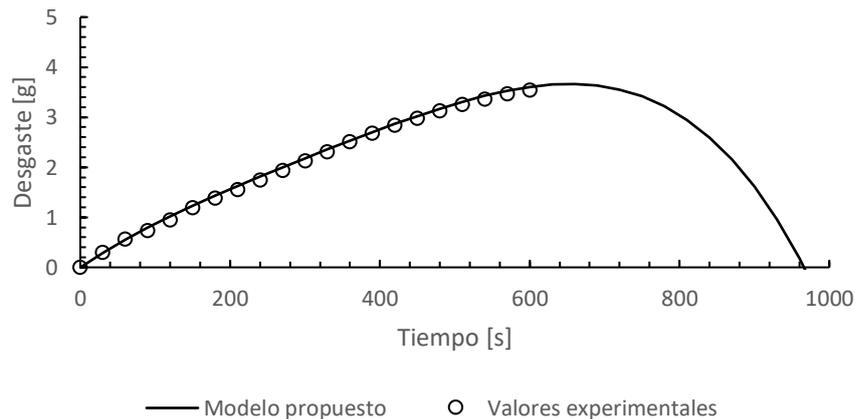


Figura 4.6 Comportamiento del modelo posterior a los 600 s

En la figura 4.6, se muestra como en la ecuación del primer modelo propuesto a partir de los 930 segundos se obtienen valores de desgaste negativos, que no concuerdan con la tendencia de desgaste identificada experimentalmente. Como solución de este problema en el modelamiento matemático de este fenómeno se plantea cambiar el tipo de ecuación de una polinómica a una de tipo potencial.

El método empleado para la construcción del nuevo modelo también será la regresión, siguiendo las bases del método propuesto en el Capítulo 3. Para empezar, es necesario construir una ecuación lineal a partir de la ecuación 4.5, correspondiente al modelo de una ecuación potencial.

$$y = a * x^b \quad [4.5]$$

$$\log(y) = \log(a * x^b)$$

$$\log(y) = \log(a) + \log(x^b)$$

$$\log(y) = \log(a) + \log(x^b)$$

$$\log(y) = \log(a) + b * \log(x)$$

Para poder obtener una ecuación lineal se realizará un cambio de variable, donde:

$$U = \log(y)$$

$$A = \log(a)$$

$$V = \log(X)$$

De este modo se obtiene la ecuación 4.6.

$$U = A + b * V \quad [4.6]$$

Para el específico caso del modelamiento del fenómeno de desgaste el cambio de variable se realizó de la siguiente manera:

$$U = \log(dW)$$

$$B_0 = \log(a)$$

$$V = \log(t)$$

$$B_1 = b$$

En el Anexo II, se tienen los valores de la variación del desgaste y el tiempo al que corresponde dicha variación, mientras que en la figura 4.7 se tiene la representación de los valores.

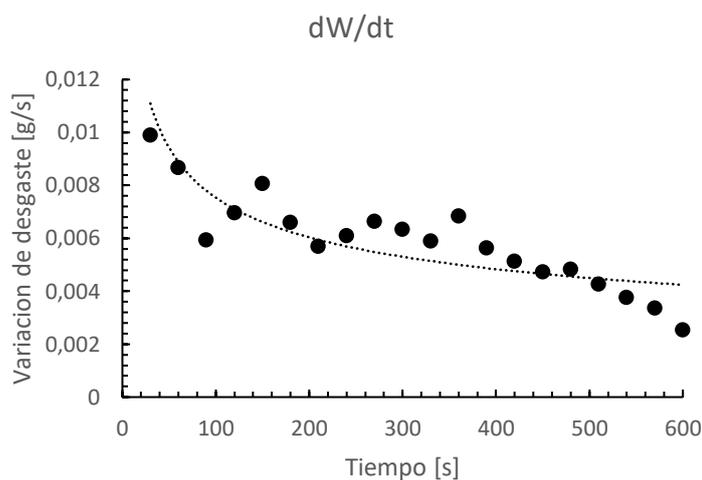


Figura 4.7 Comportamiento de la variación del desgaste

En la tabla 4.10, se encuentran los valores respectivos a las nuevas variables, que son utilizados para realizar la regresión y obtener la ecuación que describe el comportamiento de la derivada del desgaste.

Tabla 4.10 Cambio de variable, cálculo de valores

Tiempo (min) t	dw/dt	V=log t	U=log dW/dt
0	0		
30	0,0099	1,47712125	-2,00436481
60	0,00866667	1,77815125	-2,06214791
90	0,00593333	1,95424251	-2,22670125
120	0,00696667	2,07918125	-2,15697497
150	0,00806667	2,17609126	-2,09330589
180	0,0066	2,25527251	-2,18045606
210	0,0057	2,32221929	-2,24412514
240	0,0061	2,38021124	-2,21467016
270	0,00663333	2,43136376	-2,17826818
300	0,00633333	2,47712125	-2,19836765
330	0,0059	2,51851394	-2,22914799
360	0,00683333	2,5563025	-2,16536739
390	0,00563333	2,59106461	-2,24923455
420	0,00513333	2,62324929	-2,28960053
450	0,00473333	2,65321251	-2,32483291
480	0,00483333	2,68124124	-2,31575325
510	0,00426667	2,70757018	-2,36991129
540	0,00376667	2,73239376	-2,42404281
570	0,00336667	2,75587486	-2,47279988
600	0,00253333	2,77815125	-2,59630766

Por lo tanto, las matrices son:

$$V = \begin{pmatrix} 1,477121255 \\ 1 & 1,77815125 \\ 1 & 1,954242509 \\ 1 & 2,079181246 \\ 1 & 2,176091259 \\ 1 & 2,255272505 \\ 1 & 2,322219295 \\ 1 & 2,380211242 \\ 1 & 2,431363764 \\ 1 & 2,477121255 \\ 1 & 2,51851394 \\ 1 & 2,556302501 \\ 1 & 2,591064607 \\ 1 & 2,62324929 \\ 1 & 2,653212514 \\ 1 & 2,681241237 \\ 1 & 2,707570176 \\ 1 & 2,73239376 \\ 1 & 2,755874856 \\ 2,77815125 \end{pmatrix} \quad U = \begin{pmatrix} -2,004364805 \\ -2,062147907 \\ -2,226701252 \\ -2,156974969 \\ -2,093305889 \\ -2,180456064 \\ -2,244125144 \\ -2,214670165 \\ -2,178268178 \\ -2,198367654 \\ -2,229147988 \\ -2,165367394 \\ -2,24923455 \\ -2,289600534 \\ -2,32483291 \\ -2,315753252 \\ -2,369911285 \\ -2,424042811 \\ -2,472799881 \\ -2,596307662 \end{pmatrix}$$

$$A = V^T * V = \begin{pmatrix} 20 & 47,92854971 \\ 47,92854971 & 117,2242835 \end{pmatrix}$$

$$H = V^T * U = \begin{pmatrix} -44,9963803 \\ -108,5897745 \end{pmatrix}$$

La solución o matriz B es:

$$B = A^{-1} * H = \begin{pmatrix} -1,481164868 \\ -0,320750013 \end{pmatrix}$$

Para finalizar se retoman las ecuaciones con las que se trabajó al principio y se encuentran lo diferentes coeficientes para la ecuación exponencial

$$B_0 = \log(a)$$

$$-1,481164868 = \log(a)$$

$$a = 10^{-1,481164868}$$

$$a = 0,033024$$

$$B_1 = b$$

$$b = -0,320750013$$

Finalmente es posible construir la ecuación 4.7, correspondiente a la derivada del desgaste con respecto al tiempo.

$$\frac{dW}{dt} = 0,033 * t^{-0.321} \quad [4.7]$$

Para poder obtener la ecuación 4.8 la cual corresponde al comportamiento del modelo de desgaste es necesario integrar con respecto al tiempo la ecuación 4.7.

$$\int \frac{dW}{dt} dt = \int 0,033 * t^{-0.321} dt$$

$$W = \frac{0,033}{0,679} * t^{0,679} + C$$

$$W = 0,0486 * t^{0,679} + C \quad [4.8]$$

El cálculo del coeficiente C se realiza utilizando los valores experimentales y posteriormente determinar el valor medio de C, con el fin de acercarse a el comportamiento de los valores experimentales, tal como se muestra en el Anexo III.

Con el ajuste realizado el modelo final que describe el comportamiento del desgaste con 90 N esta descrito por la ecuación 4.9.

$$W = 0,0486 * t^{0,679} - 0,1852519 \quad [4.9]$$

En el Anexo IV, se encuentran los valores obtenidos por el modelo propuesto, así como los valores obtenidos de forma experimental, con el modelo propuesto se obtienen valores realistas a partir de los 30 segundos, ya que previo a este tiempo se obtienen valores de desgaste negativos que no concuerda con la realidad, por lo tanto, este hecho permite establecer que el modelo es preciso a partir de los 30 segundos. En la figura 4.8 se observa el ajuste de los valores de desgaste calculados con el modelo propuesto con los valores obtenidos experimentalmente.

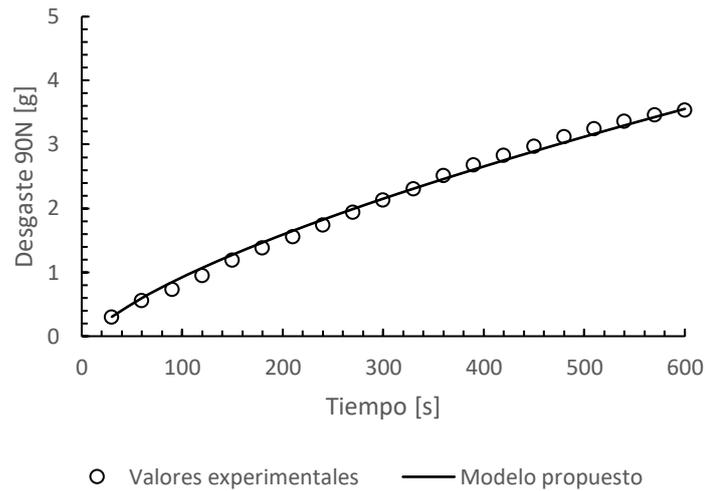


Figura 4.8 Comparación entre los valores experimentales y el modelo propuesto

4.2.2 Modelamiento para el desgaste en amianto

El modelo básico que describe el comportamiento del desgaste se basa en la ecuación 4.10, únicamente variarán los coeficientes según la carga a la cual se someta a la probeta, posteriormente se detallará como es el comportamiento de dichos coeficientes en función de la carga que se aplica. El modelo general se encuentra en la ecuación 4.10, en la tabla 4.11 se encuentran los diferentes coeficientes según la carga aplicada, además su ajuste con respecto a los valores experimentales se encuentra en los Anexos V, VI y VII

$$W = a * t^b + C \quad [4.10]$$

Tabla 4.11 Coeficientes de desgaste (amianto)

Coeficientes	Cargas aplicadas		
	110 N	130 N	150 N
a	0,041689751	0,065620329	0,23597561
b	0,722	0,669	0,492
C	-0,128954003	-0,261315949	-0,782921031

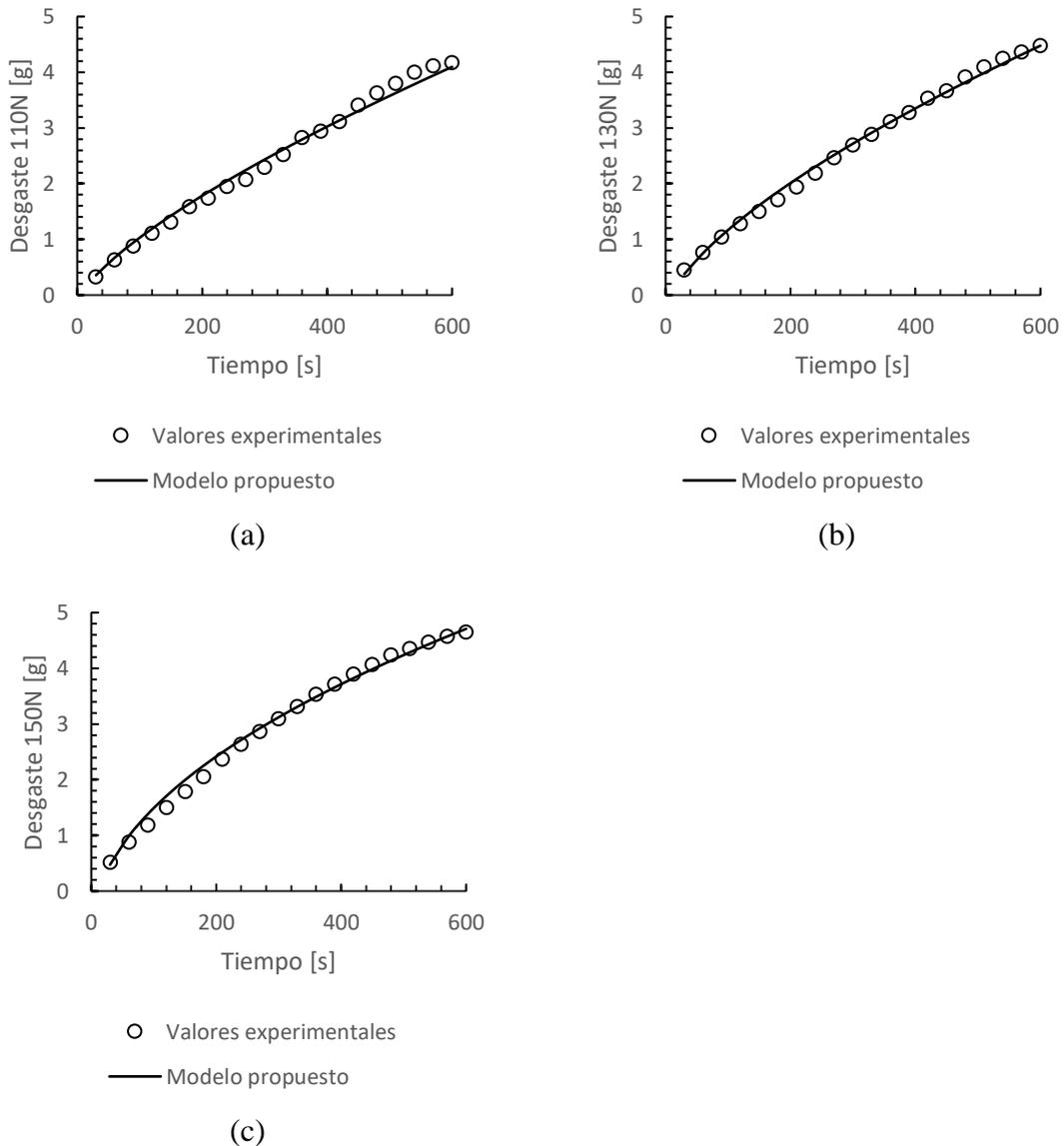


Figura 4.9 Verificación del ajuste entre los valores experimentales y el modelo propuesto (amianto)

En la figura 4.9 es posible identificar cual es el comportamiento de los modelos propuestos con respecto a sus respectivos valores experimentales, los gráficos a, b y c corresponden a los modelos de desgaste bajo la aplicación de 110 N, 130 N y 150 N respectivamente.

4.2.3 Modelamiento para el desgaste en cerámicas

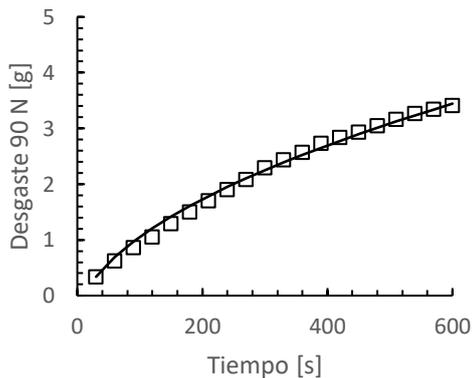
Semejante a los modelos de desgaste de amianto los diferentes modelos de desgaste en material cerámico se basarán en la ecuación 4.11, únicamente variarán los coeficientes dependiendo del estado de carga con el que se requiera calcular los valores de desgaste, dichos coeficientes se pueden encontrar en la tabla 4.12. Los valores obtenidos mediante los

diferentes modelos y su respectiva comparación con los valores experimentales se encuentran en los Anexos VIII, IX, X y XI.

$$W = d * t^e + F \quad [4.11]$$

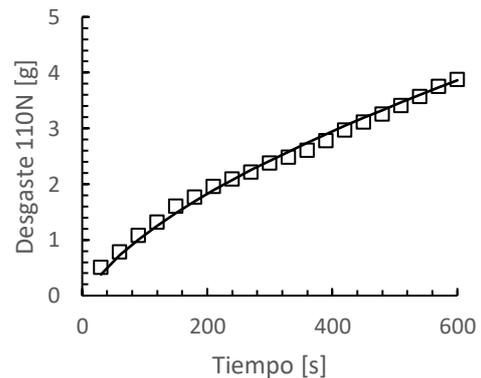
Tabla 4.12 Coeficientes de desgaste (amianto)

Coeficientes	Cargas aplicadas			
	90 N	110 N	130 N	150 N
d	0,135361217	0,079288026	0,077237049	0,289852008
e	0,526	0,618	0,637	0,473
F	-0,471683312	-0,269597404	-0,264202425	-0,928910121



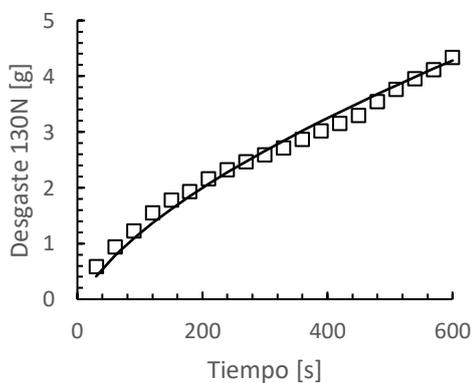
— Modelo propuesto
□ Valores experimentales

(a)



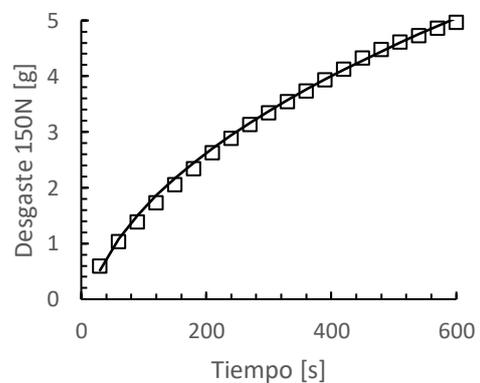
— Modelo propuesto
□ Valores experimentales

(b)



— Modelo propuesto
□ Valores experimentales

(c)



— Modelo propuesto
□ Valores experimentales

(d)

Figura 4.10 Verificación del ajuste entre los valores experimentales y el modelo propuesto (cerámica)

En la figura 4.10 se identifican a los cuadrados como los valores experimentales de desgaste y la línea continua como el desgaste calculado con los modelos propuestos, tal cómo se observa el modelo propuesto describe con gran precisión el comportamiento del desgaste experimental. Las gráficas a, b, c y d corresponden a las gráficas de desgaste con carga de 90 N, 110 N, 130 N y 150 N respectivamente.

4.2.4 Coeficientes del modelo

La ecuación 4.5 es la representación básica del modelo de desgaste abrasivo, los coeficientes de la ecuación varían en función de la carga que se aplica a las probetas y del material del cual las probetas están construidas. Por lo tanto, se presentarán ecuaciones con las que se obtendrá el valor de los coeficientes en función de las cargas aplicadas.

4.2.4.1 Coeficientes para el desgaste sobre probetas de amianto

Para determinar la ecuación que determina los diferentes coeficientes de los modelos propuestos también se ha utilizado el método de regresión, para el caso particular de los coeficientes se ha realizado regresión polinómica cuadrática. Las ecuaciones 4.12, 4.13 y 4.15 corresponden a las funciones que correspondientes a los coeficientes a, b y C respectivamente. Todas las ecuaciones dependen de la carga, P, que se aplica sobre las probetas.

$$a = 0,000111 * P^2 - 0,02366 * P + 1,2863 \quad [4.12]$$

$$b = -0,0001375 * P^2 + 0,02993 * P - 0,90135 \quad [4.13]$$

$$C = -0,00036199 * P^2 + 0,07705861 * P - 4.2049 \quad [4.14]$$

4.2.4.2 Coeficientes para el desgaste sobre probetas cerámicas

El desgaste de las probetas cerámicas también está descrito por una ecuación de tipo exponencial semejante a la ecuación 4.5, solamente cambiarán los coeficientes debido a su relación con la carga aplicada y el tipo de material. Las ecuaciones 4.15, 4.16 y 4.17 son funciones de la carga aplicada sobre la probeta cerámica para calcular los coeficientes d, e y F respectivamente.

$$d = 0,000168 * P^2 - 0,038 * P + 2,20281 \quad [4.15]$$

$$e = -0,00016 * P^2 + 0,0377 * P - 1,5765 \quad [4.16]$$

$$F = -0,00054 * P^2 + 0,123188 * P - 7.1941 \quad [4.17]$$

4.3 Validación de los resultados

Con el fin de validar los diferentes modelos propuestos en el presente trabajo de titulación es necesario utilizar otra ecuación generalmente utilizada para describir el desgaste abrasivo. Pérez Oviedo (2010) destaca que una de las ecuaciones más generales para el cálculo de desgaste abrasivo es la ecuación propuesta por Archard en 1953.

$$V = k \frac{L * x}{H} \quad [4.18]$$

En la ecuación 4.18 V es el volumen de material perdido, H es la dureza del material (este valor debe corresponder al del material de menor dureza), L es la fuerza normal aplicada sobre el material, x es la distancia de deslizamiento y k es el factor adimensional conocido como coeficiente de desgaste (Pérez Oviedo, 2010).

Los modelos propuestos en el presente trabajo tienen como variables el desgaste de material expresado en gramos y el tiempo de ensayo en segundos. Para ser posible comparar el comportamiento de los modelos es necesario expresar la ecuación de Archard en las variables previamente explicadas.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$V = \frac{m}{\rho} \quad [4.19]$$

A partir de la fórmula de la densidad se despeja el volumen obteniendo la ecuación 4.19. Para determinar la distancia de deslizamiento se utilizará la fórmula de distancia de M.C.U.

$$x = v * t \quad [4.20]$$

$$v = w * r \quad [4.21]$$

$$x = w * r * t \quad [4.22]$$

Se reemplaza la ecuación 4.21 en la ecuación 4.20, obteniendo la ecuación 4.22.

Finalmente, se reemplaza 4.19 y 4.22 en la ecuación original de Archard, ecuación 4.18, y se despeja la masa perdida obteniendo la ecuación 4.23.

$$\frac{m}{\rho} = k \frac{L * w * r * t}{H}$$

$$m = k \frac{L * w * r * t * \rho}{H} \quad [4.23]$$

Donde las nuevas variables son w la velocidad angular del disco, ρ la densidad de la probeta y r el radio del disco de acero.

4.3.1 Determinación del factor K

Al contar con valores experimentales de desgaste de las probetas y con el resto de los valores necesarios en la ecuación 4.32 a excepción del valor de k se hace necesario determinarlo, por lo tanto, a partir de la ecuación 4.31 se despeja k , obteniendo la ecuación 4.24.

$$k = \frac{m * H}{L * w * r * t * \rho} \quad [4.24]$$

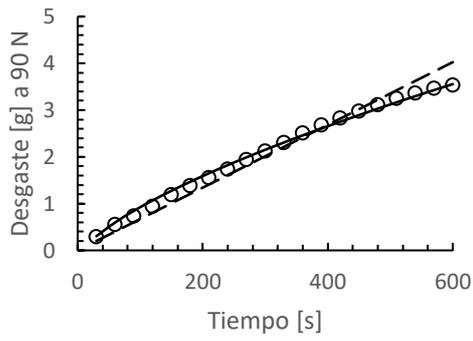
La dureza del amianto según Martínez Pilamunga & Toasa Toapanta (2019) es $2.20 * 10^8$ Pa, mientras que la dureza de las probetas cerámicas según Yunga Toaquiza & Ocampo Visuma (2021) es de $1.31 * 10^9$ Pa. El cálculo de k se realizó para todos los valores experimentales encontrados y posteriormente se determinó el valor medio.

El valor de k calculado para las probetas de amianto es 3380,0734 y el valor de k para las probetas cerámicas es 22141.357. Reemplazando el valor de k en la ecuación 4.23, se obtienen la ecuación 4.25 para el desgaste abrasivo en amianto y la ecuación 4.26 para el desgaste abrasivo de pastillas cerámicas.

$$m = 3380,0734 \frac{L * w * r * t * \rho}{H} \quad [4.25]$$

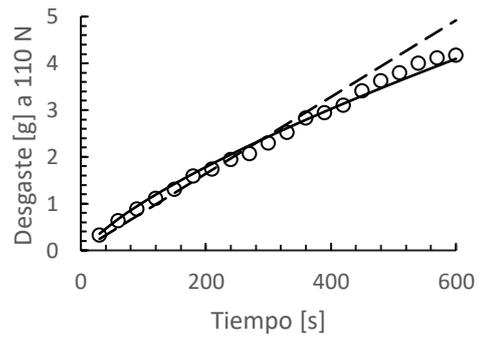
$$m = 22141,357 \frac{L * w * r * t * \rho}{H} \quad [4.26]$$

Con las ecuaciones 4.25 y 4.26 se ha calculado el desgaste abrasivo según Archard y se ha comparado con los valores experimentales y el modelo propuesto.



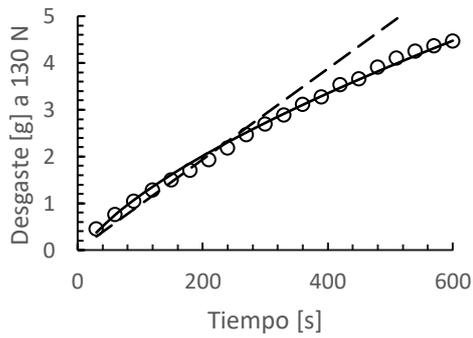
○ Valores experimentales
 — Modelo propuesto
 - - - Archard

(a)



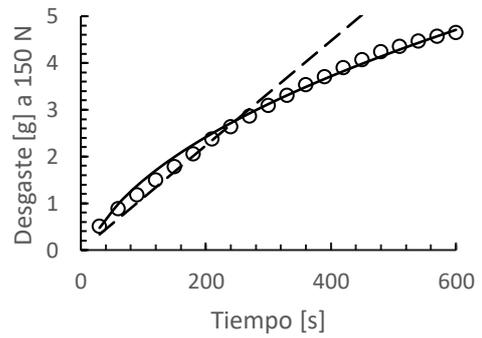
○ Valores experimentales
 — Modelo propuesto
 - - - Archard

(b)



○ Valores experimentales
 — Modelo propuesto
 - - - Archard

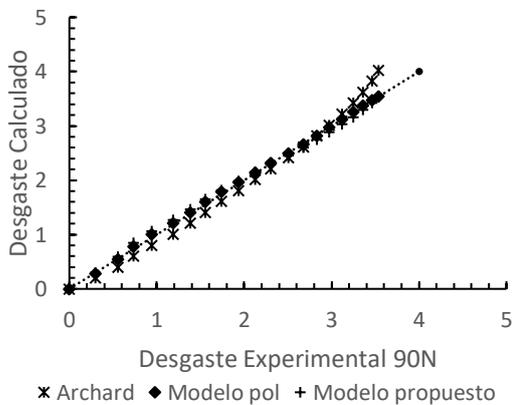
(c)



○ Valores experimentales
 — Modelo propuesto
 - - - Archard

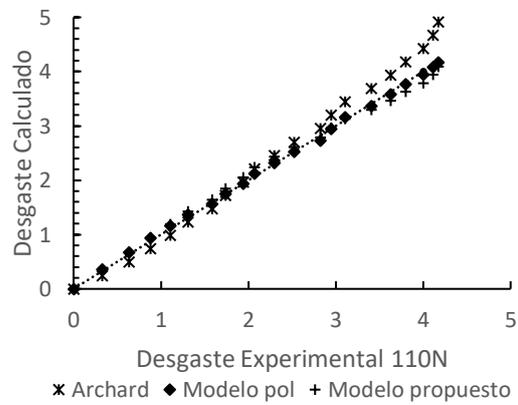
(d)

Figura 4.11 Comparación de desgaste entre el modelo de Archard, el modelo propuesto y valores experimentales de amianto



× Archard ◆ Modelo pol + Modelo propuesto

(a)



× Archard ◆ Modelo pol + Modelo propuesto

(b)

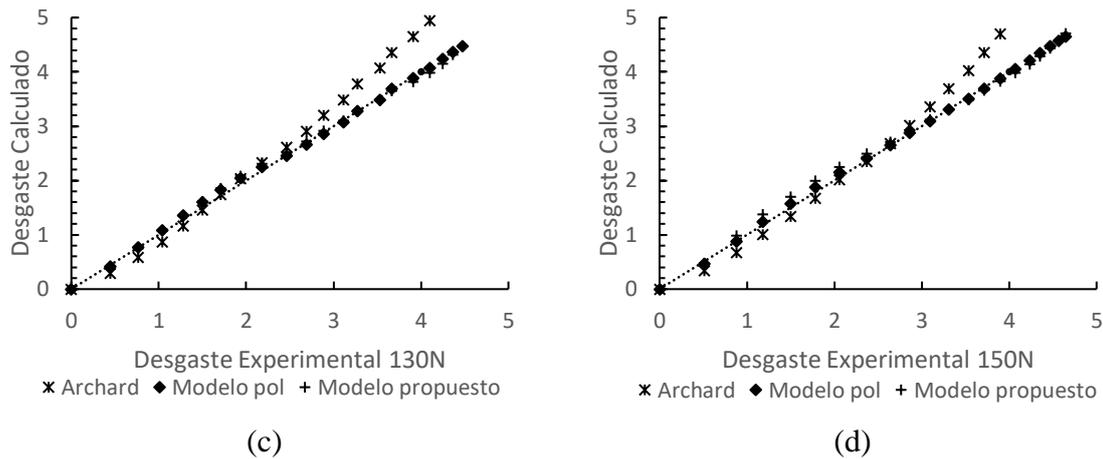
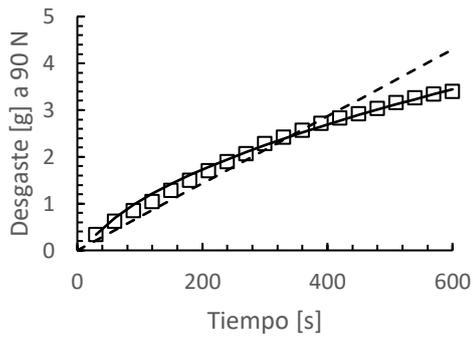


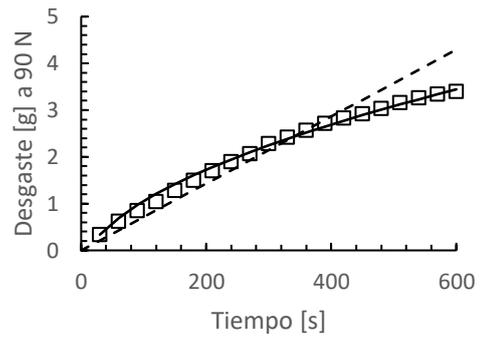
Figura 4.12 Comparación de desgaste entre el modelo de Archard, el modelo propuesto y valores experimentales de amianto

La figura 4.11 corresponde a la comparación de los valores de desgaste experimentales, los valores de desgaste obtenidos mediante el modelo propuesto y el desgaste calculado por la ecuación de Archard representados por la circunferencia, la línea continua y la línea entre cortada respectivamente. Para el caso de los cuatro ensayos sobre las probetas de amianto los modelos propuestos se adaptan de manera más precisa al comportamiento de los valores experimentales con mínimas diferencias en puntos específicos como se muestra en la figura 4.15 (b), pero de forma general manteniendo la misma tendencia de crecimiento. Por otra parte, la ecuación de Archard al tener una gráfica lineal simplemente coincide con los valores experimentales en un punto y distanciándose cada vez más con respecto al resto de los valores, la representación gráfica del desgaste según la ecuación de Archard evidencia que la pendiente va creciendo conforme la carga lo hace. En la figura 4.15 (d) el desgaste obtenido mediante Archard sea 41,89% mayor a los valores experimentales. Los valores de Archard son menos confiables conforme avanza el tiempo del ensayo en comparación al modelo propuesto, al comparar el valor obtenido en el mismo punto y bajo la misma carga apenas tiene una diferencia del 1,75% con respecto a los valores experimentales.



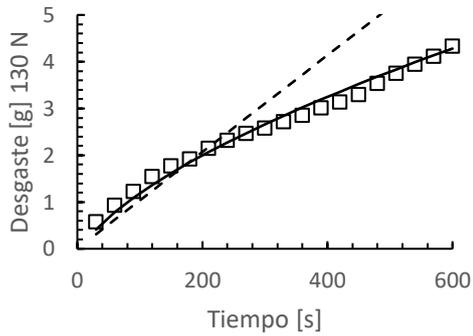
— Modelo propuesto
 □ Valores experimentales
 - - - Archard

(a)



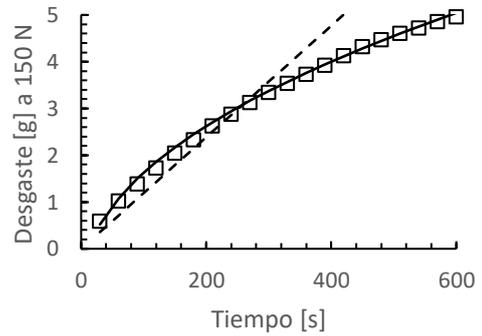
— Modelo propuesto
 □ Valores experimentales
 - - - Archard

(b)



— Modelo propuesto
 □ Valores experimentales
 - - - Archard

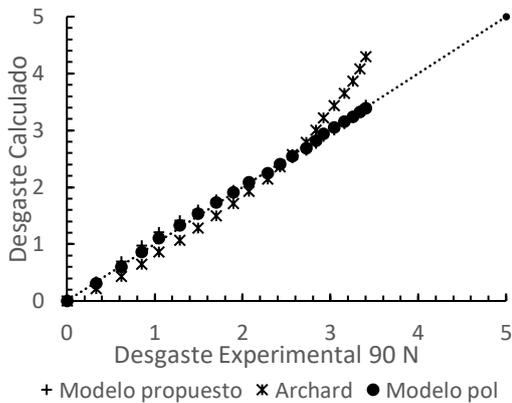
(c)



— Modelo propuesto
 □ Valores experimentales
 - - - Archard

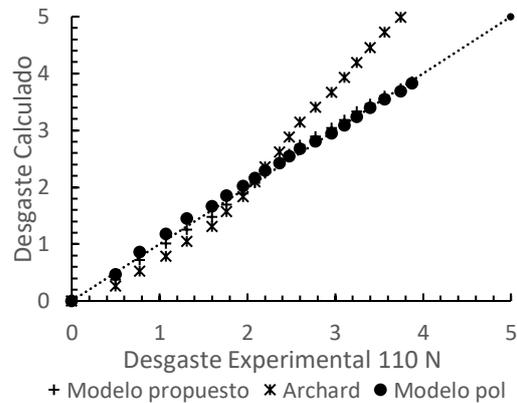
(d)

Figura 4.13 Comparación de desgaste entre el modelo de Archard, el modelo propuesto y valores experimentales de pastillas cerámicas



+ Modelo propuesto * Archard ● Modelo pol

(a)



+ Modelo propuesto * Archard ● Modelo pol

(b)

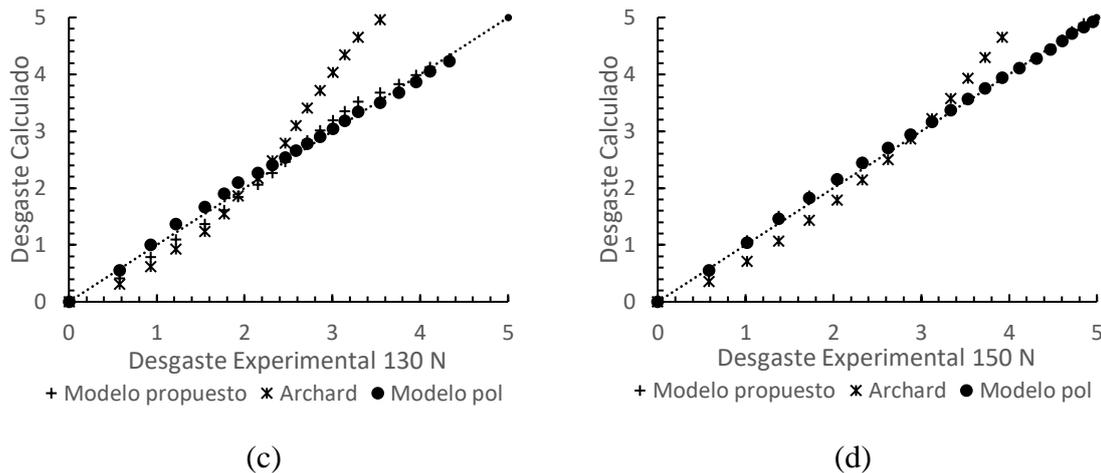


Figura 4.14 Comparación de desgaste entre el modelo de Archard, el modelo propuesto y valores experimentales de amianto

En la figura 4.13 se compara el comportamiento de la ecuación de Archard con el modelo propuesto para el desgaste en material cerámico. Al igual que el análisis hecho a partir de la figura 4.11 Archard ofrece un mejor ajuste a los valores reales a comparación de los modelos propuestos. En la figura 4.13 (d) con la mayor carga aplicada la pendiente de la ecuación de Archard hace que los valores de desgaste obtenidos por dicha ecuación sean muy lejanos de los valores experimentales. Conforme la carga aplicada aumenta la ecuación de Archard obtiene valores más alejados a los reales al finalizar el tiempo de ensayo.

En la figura 4.12 y 4.14 se comparan los valores los valores calculados con el modelo polinómico, potencial y la ecuación de Archard con los valores experimentales. El ajuste de los valores calculados y los experimentales se evidenciará si la tendencia de los puntos se acerca a una ecuación lineal de pendiente 1 que pasa por el origen. Para los 4 estados de carga con los cuales se realizaron los ensayos tanto el modelo polinómico como el modelo potencial presentan una tendencia muy cercana a la esperada, demostrando que los modelos propuestos son útiles para obtener valores de desgaste confiables. Por otra parte, la tendencia observada con la ecuación de Archard tanto para las probetas cerámicas y de amianto se destaca que para el final del tiempo de ensayo los valores calculados son muy distantes a los reales.

4.4 Modelo general

Posterior a analizar el comportamiento de los coeficientes de los diferentes modelos propuestos y la relación de estos con la carga aplicada se proponen dos modelos únicamente.

$$W = a * t^b + C \quad [4.27]$$

$$W = d * t^e + F \quad [4.28]$$

La ecuación 4.27 es la ecuación general para el desgaste abrasivo en pastillas de amianto, se deberá reemplazar los coeficientes con las ecuaciones 4.12, 4.13 y 4.14 para obtener el modelo general. Mientras que la ecuación 4.28 es la ecuación general para el desgaste sobre probetas cerámicas, la generalización del modelo se hará utilizando las ecuaciones 4.15, 4.16 y 4.17. En estas ecuaciones se mantiene que la variable t corresponde al tiempo en segundos a partir, su intervalo de confianza comienza a partir de los 30 segundos, la variable P corresponde a la carga aplicada sobre las probetas.

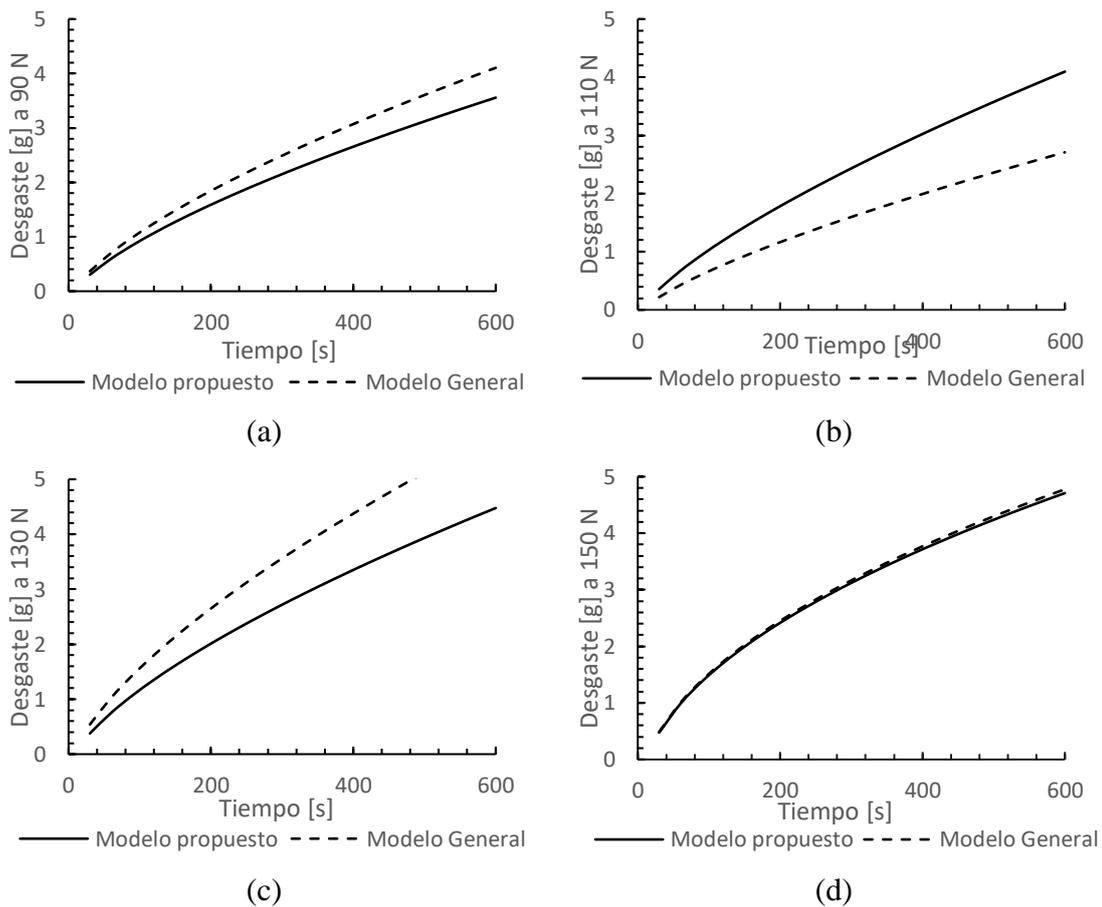


Figura 4.15 Comparación de valores de desgaste entre los modelos individuales y el modelo general en amianto

En la figura 4.15 se tiene la comparación entre los valores obtenidos por los diferentes modelos individuales y los valores de desgaste calculados mediante el modelo general. En este caso no se han añadido los valores de desgaste experimentales pues se considera que los mismos son bien representados por los diferentes modelos individuales previamente

presentados. En (a) y (c) los valores calculados por el modelo general conforme se acercan a los 600 segundos se distancian del modelo individual correspondiente, esta tendencia es más evidente en el caso de (c). Por otra parte (b) el modelo general obtiene valores menores que el modelo individual, para mismos valores de t el modelo general que rondan la mitad de los valores que se obtienen con el respectivo valor del modelo individual. El único caso para el que el modelo general y el modelo individual se comportan exactamente igual es en el caso de (d), ya que no existe una diferencia considerable entre los valores obtenidos en ambos casos.

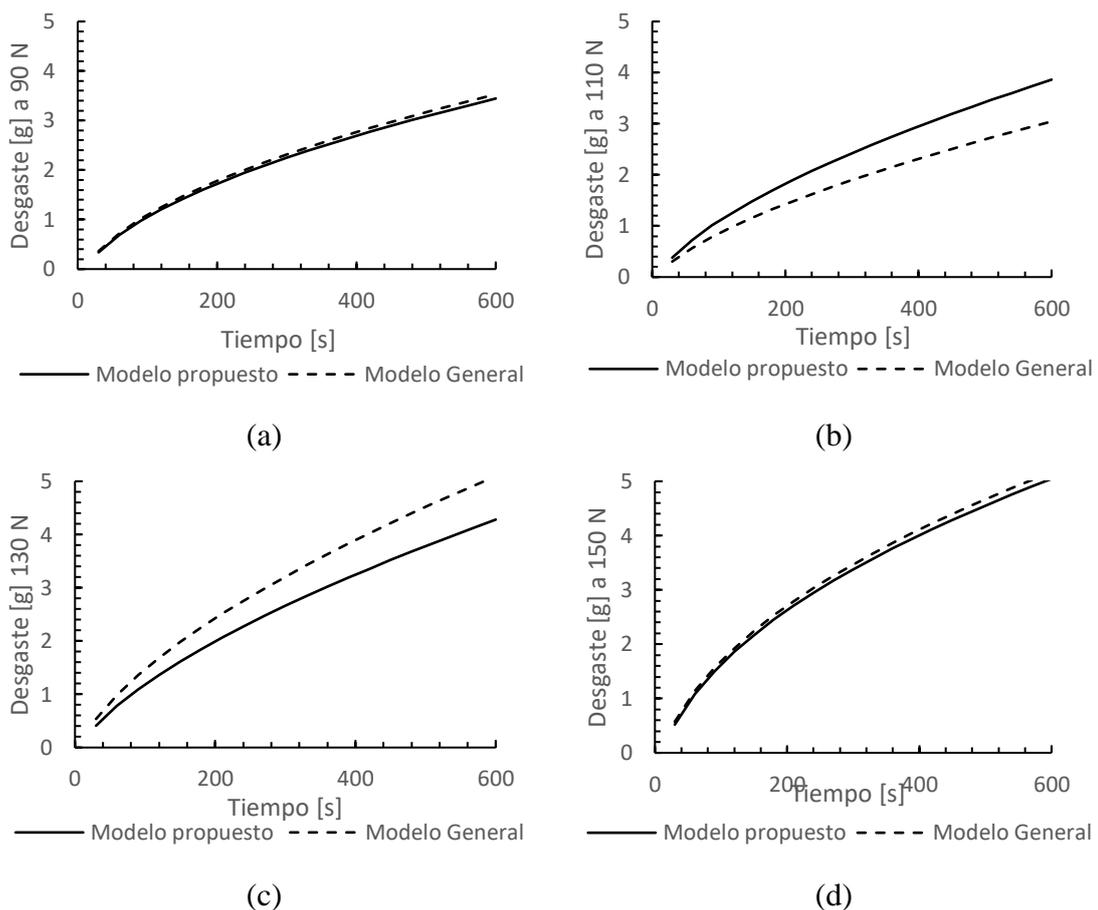


Figura 4.16 Comparación de valores de desgaste entre los modelos individuales y el modelo general en las probetas cerámicas

En la figura 4.16 se comparan los modelos individuales. Para el desgaste en las probetas cerámicas tanto en (a) como en (d) el modelo general tiene exactamente el mismo comportamiento que los modelos independientes, por lo tanto, el modelo general es confiable para ambas situaciones. Sin embargo, en el caso de (b) los valores de desgaste calculados por el modelo general son menos en comparación tanto a los valores

experimentales y los obtenidos por el modelo individual y para el caso de (c) ocurre lo contrario pues con el modelo general se obtienen valores de desgaste mucho mayores a los valores experimentales.

CAPÍTULO V

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Se analizó el campo de los sistemas de frenado y se observó que los mecanismos más utilizados para vehículos livianos son los frenos hidráulicos de disco y de tambor. Basado en el análisis bibliográfico se determinó que el 100% y el 74.03% en los frenos de disco delanteros y traseros son de disco respectivamente. De este modo en los vehículos livianos modernos la mayoría de los frenos utilizados son los frenos de disco.

Se realizaron ensayos de tipo abrasivo bajo la norma ASTM G65 en dos materiales comúnmente usados en pastillas de freno. La literatura especializada muestra que la temperatura de contacto en la superficie desgastada juega un papel importante cuando supera los 250°C en este tipo de desgaste. Si esta temperatura está entre 250°C y 400°C la variación del coeficiente de fricción es menor o igual al 10%. Si se superan los 400°C se produce el fenómeno de la cristalización del material, disminuyendo de forma significativa sus propiedades tribológicas. El presente estudio no se ha enfocado en tales condiciones puesto que se estima que el aumento de temperatura en condiciones normales de conducción no supera los 65°C según el estudio bibliográfico realizado. De esta forma, el mecanismo de desgaste estudiado es el abrasivo tal como sucede en los sistemas de frenado de los vehículos.

Una vez se ha corroborado que el principal mecanismo de desgaste es el abrasivo se determina que las variables a estudiar son de tipo mecánico y geométrico. En el desgaste intervienen el tiempo de contacto entre el disco recubierto y la probeta, la carga aplicada sobre la probeta y también el área de contacto de la probeta con el disco. Conforme el material se va desgastando, el área de contacto va aumentando. Para la estimación de esta área de contacto se ha trabajado con el software CAD SolidWorks.

De acuerdo con las variables identificadas y al comportamiento del desgaste observado experimentalmente, se proponen modelos de tipo polinómico y potencial. Con estas estructuras matemáticas se ha modelizado la tasa de desgaste de material en el tiempo. El modelo polinómico describe la evolución del desgaste dentro del dominio de modelización, con un error promedio de 2,168% para asbesto y 2,886% para el material cerámico. Fuera de este dominio, el error de estimación del desgaste con este modelo crece de forma ostensible. Esto hace que la validez de este modelo quede restringida al dominio de

modelización, no permitiendo la predicción del desgaste en el tiempo. Por otra parte, el modelo potencial describe la evolución del desgaste dentro del dominio de modelización con 4,379% - 4,483% de error tanto para el asbesto como para el material cerámico ensayado. Este modelo permite la predicción del desgaste fuera del dominio temporal de modelización y las tendencias generadas son coherentes con las observaciones experimentales fuera del dominio de modelización. Al validar los resultados con el modelo de desgaste de Archard el modelo propuesto en este trabajo se ajusta de forma más efectiva a los datos experimentales

5.2 Recomendaciones

Incluir en la planificación de las materias la visita al taller de la Carrera de Ingeniería Automotriz y el uso de equipos y maquetas con temáticas afines a la misma, para que los estudiantes puedan familiarizarse con los equipos disponibles, su funcionamiento y aplicaciones.

Analizar la aplicación de normativas referentes al uso de amianto en la venta de repuestos en el mercado nacional. así como las ventajas mecánicas y económicas del uso de pastillas de este material y posibles alternativas.

Para futuros trabajos relacionados a desgaste abrasivo basados en la normativa ASTM G-65 se propone utilizar diferentes probetas por cada uno de los intervalos de ensayo, con la finalidad de verificar si la tasa de desgaste se mantiene.

Inspeccionar constantemente la boquilla del equipo de desgaste abrasivo por arena seca, pues durante el desarrollo de los experimentos presentaba obstrucciones, que podrían haber alterado los resultados obtenidos.

REFERENCIAS

- Álvarez Mejía, D. S., & Narváez Simbaña, P. A. (2020). *Análisis del desgaste por abrasión del material de las pastillas de freno de vehículos disponibles en el mercado local mediante ensayos basados en la norma técnica ASTM G-65 para determinar su nivel de desgaste*. Ibarra: Universidad Técnica del Norte.
- Álvaro, F. (29 de 07 de 2021). *Tipos de frenos: Disco y tambor, componentes y funcionamiento*. Obtenido de autonoción: <https://www.autonocion.com/frenos-disco-tambor-componentes-tipos-funcionamiento/>
- Bhushan, B. (2013). *Introduction to Tribology Second Edition*. Columbus, Ohio: Wiley.
- Cana Anquise, L. A. (2018). *Manual Sistema Frenos Partes Funcionamiento Mecanismos Tipos Mantenimiento*. Flavisur. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/375738751/Manual-Sistemas-Frenos-Partes-Funcionamiento-Mecanismos-Tipos-Mantenimiento#>
- Cano Riancho, H. (Septiembre de 2020). *Repositorio Universidad de Cantabria*. Recuperado el 17 de Junio de 2023, de Ucrea: <http://hdl.handle.net/10902/19115>
- Cox, R. L. (2012). *Engineered Tribological composites: The art of the friction MATERIAL DEVELOPMENT*. Warrendale, Pennsylvania: SAE International.
- Devore, J. L. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. México: Cengage Learnings.
- Ecuatoriana, N. T. (03 de 2017). *NTE INEN 2185 Material de Fricción Para el Sistema de Frenos de Automotores. Requisitos y Métodos de Ensayo*. Obtenido de INEN: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas23/nte_inen_2185-4.pdf
- Guerra Morilla, J. A. (s.f.). *Manual Técnico del Sistema de Frenado RH*. Obtenido de Guadalpin.es: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.guadalpin.es/images/stories/WEB_Mecanica/documentos/STF/Manual_tribologia_Road_House.pdf
- Martínez Pilamunga, A. X., & Toasa Toapanta, W. F. (2019). *Análisis tribológico comparativo de pastillas de freno con fibras de vidrio y cabuya como materiales reemplazantes al amianto*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo .
- Mayo, P. (13 de 04 de 2019). *El Sistema de Frenos en el Automóvil*. Obtenido de Espíritu Racer: <https://espirituracer.com/reportajes/el-sistema-de-frenos-en-el-automovil-i/>

- Méndez Torres , P. W., & Muñoz Llivichuzhca, W. F. (2017). *Diseño e implementación en un sistema de medición de temperatura de frenos de disco a bordo en un vehículo*. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18786>
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2003). *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería*. México: Limus, S.A.
- Paludi, A. A. (2018). *Influencia de la Temperatura de los frenos en la Determinacion de la Eficiencia de Frenado*. Revista Skopein.
- Paola Pérez Oviedo, J. T. (2010). *Guía de diseño para calcular el desgaste abrasivo entre componentes no lubricados*. México: University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Rodriguez Ojeda, L. (2007). *Probabilidad y estadística básica para ingenieros*. Guayaquil: ESPOL.
- Santos, E., Yenque D, J., Rojas L., O., & Rosales U., V. (2001). *Notas científicas acerca del ensayo de dureza*. Industrial data.
- Sierra Castro, J. S. (2019). *Sistemas de frenos asistidos*. Lima, Perú: Universidad Nacional de Educación. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/568214468/MONOGRAFIA-SIERRA-CASTRO-JHONIUR-SHMIT-FATEC#>
- Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W. (2013). *Engineering Tribology 4ta Edición*. Boston: Elsevier Science & Technology.
- Young, H., Freedman, R. A., & Lewis Ford, A. (2009). *Física Universitaria*. México: Pearson Educación .
- Yunga Toaquiza, E. P., & Ocampo Visuma, R. S. (2021). *Comprobacion de las propiedades mecánicas de las pastillas de freno tipo cerámicas y elaboracion de las probetas de ensayo para verificar el comportamiento de los materiales*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Obtenido de <http://dspace.espace.edu.ec/handle/123456789/15470>
- Yunga Toaquiza, E. P., & Ocampo Visuma, R. S. (2021). *Comprobacion de las Propiedades Mecánicas de las Pastillas de Freno Tipo Cerámicas y Elaboracion de las Probetas de Ensayo Para Verificar el Comportamiento de los Materiales*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Zaragoza, C. (2001). *CD Intercativo Multimedia sobre: FRENOS*. Pedrola, Zaragoza, España: Cetrol Zaragoza Instituto de Investigación sobre Reparacion de Vehículos, S.A. Obtenido de <https://es.slideshare.net/juliobustinza1/manual-sistemafrenosautomoviles>

- Álvarez Mejía, D. S., & Narváez Simbaña, P. A. (2020). *Análisis del desgaste por abrasión del material de las pastillas de freno de vehículos disponibles en el mercado local mediante ensayos basados en la norma técnica Astm G-65 para determinar su nivel de desgaste*. Recuperado de <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10221>
- Arellano Rodríguez, L. M., & Noriega Brito, S. D. (2013). *Diseño y construcción de un módulo de control ABS para el banco de frenos neumáticos, del Laboratorio de Mecánica de Patio ESPE Extensión Latacunga*. Recuperado de <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/6399>
- Arman, M., Singhal, S., Chopra, P., & Sarkar, M. (2018). A review on material and wear analysis of automotive Break Pad. *Materials Today: Proceedings*, 5(14), 28305–28312. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2018.10.114>
- Bauzá Fernández, F. J. (2018). *Estudio del sistema de frenado en vehículos ligeros (turismos)*. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/113326>
- Cai, R., Zhang, J., Nie, X., Tjong, J., & Matthews, D. T. A. (2020). Wear mechanism evolution on brake discs for reduced wear and particulate emissions. *Wear*, 452–453, 203283. <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2020.203283>
- Cerrada, B. C., Martí-Amengual, G., & Sanz-Gallen, P. (2020). Presencia del amianto en la vida cotidiana: riesgos para la salud. *FMC - Formación Médica Continuada en Atención Primaria*, 27(1), 1–3. <https://doi.org/10.1016/J.FMC.2019.09.003>
- Chandra Verma, P., Menapace, L., Bonfanti, A., Ciudin, R., Gialanella, S., & Straffelini, G. (2015). Braking pad-disc system: Wear mechanisms and formation of wear fragments. *Wear*, 322–323, 251–258. <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2014.11.019>
- Chandradass, J., Baskara Sethupathi, P., & Amutha Surabi, M. (2021). Fabrication and characterization of asbestos free epoxy based brake pads using carbon fiber as reinforcement. *Materials Today: Proceedings*, 45, 7222–7227. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.02.530>

- Frenos Y Dirección Del Vehículo Anfíbio, A. DE, & Muñoz Patricio David Ing Fausto Tapia, M. (2015). *Adaptación de frenos y dirección del vehículo anfíbio*. Recuperado de <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/4400>
- G65 Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. (s/f). Recuperado el 16 de junio de 2023, de <https://www.astm.org/g0065-16r21.html>
- Gao, P., Du, Y., Ruan, J., & Yan, P. (2021). Temperature-dependent noise tendency prediction of the disc braking system. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *149*, 107189. <https://doi.org/10.1016/J.YMSSP.2020.107189>
- García-León, R. A., Díaz, R. D. E., & Solano, E. F. (2018). Análisis termodinámico de un disco de freno automotriz con pilares de ventilación tipo NACA 66-209. *INGE CUC*, *14*(2), 9–18. <https://doi.org/10.17981/INGECUC.14.2.2018.01>
- Gweon, J., Park, J., Lee, W. K., Kim, D. Y., & Jang, H. (2021). Root cause study of corrosion stiction by brake pads on the grey iron disc. *Engineering Failure Analysis*, *128*, 105583. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANAL.2021.105583>
- Jacob Moses, A., Suresh Babu, A., & Ananda Kumar, S. (2020). Analysis of physical properties and wear behavior of phenol formaldehyde – Basalt fiber reinforced brake pad. *Materials Today: Proceedings*, *33*, 1128–1132. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.07.228>
- Javier, N., García, R., Camilo, I., & Sánchez, N. (2017). Consideraciones para el diseño de un sistema diagnóstico de frenos de disco en un vehículo particular. *Avances Investigación en Ingeniería*, *14*(1), 76–94. <https://doi.org/10.18041/1794-4953/AVANCES.1.1286>
- Kalel, N., Bhatt, B., Darpe, A., & Bijwe, J. (2021). Copper-free brake-pads: A break-through by selection of the right kind of stainless steel

particles. *Wear*, 464–465, 203537.
<https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2020.203537>

Kalel, N., Darpe, A., & Bijwe, J. (2021). Propensity to noise and vibration emission of copper-free brake pads. *Tribology International*, 153, 106651.
<https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2020.106651>

Laguna-Camacho, J. R., Juárez-Morales, G., Calderón-Ramón, C., Velázquez-Martínez, V., Hernández-Romero, I., Méndez-Méndez, J. V., & Vite-Torres, M. (2015). A study of the wear mechanisms of disk and shoe brake pads. *Engineering Failure Analysis*, 56, 348–359.
<https://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANAL.2015.01.004>

Lenin, J., Grefa, S., Patricio, Á., & Casanova, F. (2012). *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 ESPOCH*. Recuperado de
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/2288>

Norma Astm E23 | PDF. (s/f). Recuperado el 16 de junio de 2023, de
<https://es.scribd.com/doc/143596872/Norma-Astm-e23#>

Norma Astm g99 Traducida | PDF | Medición | Desviación Estándar. (s/f). Recuperado el 16 de junio de 2023, de
<https://es.scribd.com/document/429035543/Norma-Astm-g99-Traducida>

Park, J., Song, W., Gweon, J., Seo, H., Lee, J. J., & Jang, H. (2021). Size effect of zircon particles in brake pads on the composition and size distribution of emitted particulate matter. *Tribology International*, 160, 106995.
<https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2021.106995>

Selvam, P. T., Pugazhenti, R., Dhanasekaran, C., Chandrasekaran, M., & Sivaganesan, S. (2021). Experimental Investigation on the Frictional Wear Behaviour of TiAlN Coated Brake Pads. *Materials*

Today: Proceedings, 37(Part 2), 2419–2426.
<https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.08.272>

Seo, H., Park, J., Kim, Y. C., Lee, J. J., & Jang, H. (2021). Effect of disc materials on brake emission during moderate-temperature braking. *Tribology International*, 163, 107185.
<https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2021.107185>

Song, W., Park, J., Choi, J., Lee, J. J., & Jang, H. (2021). Effects of reinforcing fibers on airborne particle emissions from brake pads. *Wear*, 484–485, 203996.
<https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2021.203996>

Vaca Solís, J. P. (2014). *Banco de pruebas para el análisis y comportamiento térmico del sistema de frenos de disco y tambor en automóviles*. Recuperado de <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/8198>

Velasteguí Carrillo, A. J. (2015a). *Los materiales de fricción y su influencia en la eficiencia de frenado*. Recuperado de <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/4627>

Velasteguí Carrillo, A. J. (2015b). *Los materiales de fricción y su influencia en la eficiencia de frenado*. Recuperado de <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/4627>

Zambrano Santos, S. A., Viláñez Ponce, E. F., Zambrano Santos, S. A., & Viláñez Ponce, E. F. (2018). *Análisis del desgaste de pastillas de frenos en comparativa entre 2500 metros de altura y a nivel del mar*. Recuperado de <https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/2570>

ANEXOS

ANEXO I

Variación del desgaste en amianto a 90 N y probeta posterior a los ensayos realizados

90 N		
Número de observación (i)	Tiempo (s)	Variación del desgaste (g/s) w
1	0	0
2	30	0,0099
3	60	0,00866667
4	90	0,00593333
5	120	0,00696667
6	150	0,00806667
7	180	0,0066
8	210	0,0057
9	240	0,0061
10	270	0,00663333
11	300	0,00633333
12	330	0,0059
13	360	0,00683333
14	390	0,00563333
15	420	0,00513333
16	450	0,00473333
17	480	0,00483333
18	510	0,00426667
19	540	0,00376667
20	570	0,00336667
21	600	0,00253333



ANEXO II

Variación del desgaste a 90 N de carga

Tiempo (min) t	dw/dt
0	0
30	0,0099
60	0,00866667
90	0,00593333
120	0,00696667
150	0,00806667
180	0,0066
210	0,0057
240	0,0061
270	0,00663333
300	0,00633333
330	0,0059
360	0,00683333
390	0,00563333
420	0,00513333
450	0,00473333
480	0,00483333
510	0,00426667
540	0,00376667
570	0,00336667
600	0,00253333

ANEXO III

Cálculo del coeficiente C en el modelamiento potencial

t	Modelamiento sin ajuste	Valores experimentales	Coeficiente C
0	0	0	0
30	0,48933863	0,297	-0,19233863
60	0,78344563	0,557	-0,22644563
90	1,03175084	0,735	-0,29675084
120	1,25431967	0,944	-0,31031967
150	1,45952027	1,186	-0,27352027
180	1,65186365	1,384	-0,26786365
210	1,83413402	1,555	-0,27913402
240	2,00820294	1,738	-0,27020294
270	2,1754052	1,937	-0,2384052
300	2,33673518	2,127	-0,20973518
330	2,49295897	2,304	-0,18895897
360	2,64468263	2,509	-0,13568263
390	2,79239617	2,678	-0,11439617
420	2,9365029	2,832	-0,1045029
450	3,07733986	2,974	-0,10333986
480	3,21519239	3,119	-0,09619239
510	3,35030477	3,247	-0,10330477
540	3,48288816	3,36	-0,12288816
570	3,61312671	3,461	-0,15212671
600	3,74118225	3,537	-0,20418225
			-0,18525194

ANEXO IV

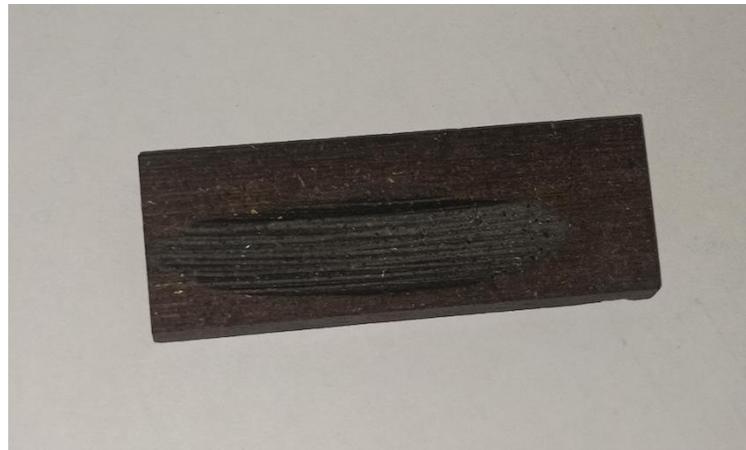
Desgaste obtenido mediante el modelo propuesto a 90 N de carga y su comparación con los valores experimentales

t	Valores experimentales	Modelamiento propuesto
0	0	-0,185251944
30	0,297	0,304086681
60	0,557	0,59819369
90	0,735	0,846498892
120	0,944	1,069067722
150	1,186	1,274268324
180	1,384	1,466611706
210	1,555	1,648882077
240	1,738	1,822950996
270	1,937	1,990153251
300	2,127	2,151483239
330	2,304	2,307707026
360	2,509	2,45943069
390	2,678	2,607144226
420	2,832	2,751250954
450	2,974	2,892087918
480	3,119	3,029940449
510	3,247	3,165052822
540	3,36	3,297636212
570	3,461	3,427874768
600	3,537	3,555930301

ANEXO V

Comparación entre los valores reales y el modelo propuesto a 110 N de carga y la probeta sobre la que se realizó el ensayo

t	Valores experimentales	Modelamiento propuesto
0	0	-0,128954003
30	0,327	0,356905659
60	0,632	0,672455524
90	0,88	0,94501659
120	1,108	1,192944643
150	1,309	1,424030732
180	1,588	1,642525153
210	1,74	1,851075351
240	1,944	2,051474319
270	2,07	2,245008941
300	2,294	2,432643221
330	2,524	2,615123432
360	2,824	2,793042579
390	2,945	2,966881984
420	3,108	3,137039268
450	3,41	3,303847826
480	3,628	3,467590772
510	3,802	3,628511181
540	4,003	3,786819764
570	4,112	3,942700731
600	4,175	4,096316334



ANEXO VI

Valores de desgaste experimental y obtenidos por el modelo propuesto a 130 N de carga y la probeta sobre la que se realizó el ensayo

t	Valores experimentales	Modelamiento propuesto
0	0	-0,261315949
30	0,445	0,377289356
60	0,762	0,754047648
90	1,039	1,07044612
120	1,277	1,353082219
150	1,502	1,613002823
180	1,707	1,856146457
210	1,934	2,08617059
240	2,184	2,305529517
270	2,464	2,515971047
300	2,692	2,71879561
330	2,885	2,915003898
360	3,113	3,105386815
390	3,27	3,290583188
420	3,533	3,471118402
450	3,665	3,647431171
480	3,913	3,819892624
510	4,1	3,988820277
540	4,251	4,15448845
570	4,367	4,317136214
600	4,473	4,476973521



ANEXO VII

Comparación valores de desgaste experimentales y calculados por el modelo propuesto a 150 N y la probeta sobre la que se realizó el ensayo

t	Valores experimentales	Modelamiento propuesto
0	0	-0,782921031
30	0,513	0,474876606
60	0,88	0,986037012
90	1,183	1,376585052
120	1,498	1,704929531
150	1,782	1,993619493
180	2,057	2,254193639
210	2,369	2,493494757
240	2,639	2,715975082
270	2,862	2,924723494
300	3,092	3,121986681
330	3,309	3,309459175
360	3,534	3,488456388
390	3,711	3,660023627
420	3,896	3,825007853
450	4,07	3,98410665
480	4,238	4,13790267
510	4,3488	4,286888501
540	4,469	4,431485017
570	4,569	4,572055181
600	4,648	4,708914622



ANEXO VIII

Comparación de valores experimentales y valores del modelo propuesto con 90 N de carga (cerámica) y la probeta sobre la que se realizó el ensayo

t	Valores experimentales	Modelo propuesto
30	0,333	0,338270082
60	0,617	0,694593946
90	0,85	0,971846673
120	1,046	1,207675838
150	1,281	1,416822178
180	1,493	1,606900722
210	1,697	1,782460388
240	1,892	1,946478523
270	2,072	2,101031159
300	2,283	2,247634888
330	2,425	2,387437994
360	2,563	2,521334937
390	2,721	2,650038743
420	2,833	2,774128798
450	2,922	2,894083562
480	3,038	3,010303648
510	3,157	3,123128517
540	3,257	3,232848829
570	3,337	3,339715757
600	3,402	3,44394813



ANEXO IX

Valores de desgaste experimentales y modelo propuesto con 110 N de carga (cerámica) y la probeta sobre la que se realizó el ensayo

t	Valores experimentales	Modelo propuesto
30	0,5	0,379139405
60	0,774	0,726048881
90	1,072	1,009576161
120	1,31	1,258466845
150	1,598	1,484412346
180	1,761	1,693609231
210	1,953	1,889832589
240	2,086	2,075593237
270	2,205	2,252665841
300	2,37	2,422362212
330	2,479	2,585685992
360	2,598	2,743426315
390	2,774	2,896217593
420	2,961	3,044579347
450	3,103	3,188943676
480	3,249	3,329674777
510	3,398	3,467083166
540	3,561	3,601436264
570	3,748	3,73296642
600	3,874	3,861877107



ANEXO X

Valores de desgaste experimentales y modelo propuesto con 130 N de carga (cerámica) y la probeta sobre la que se realizó el ensayo

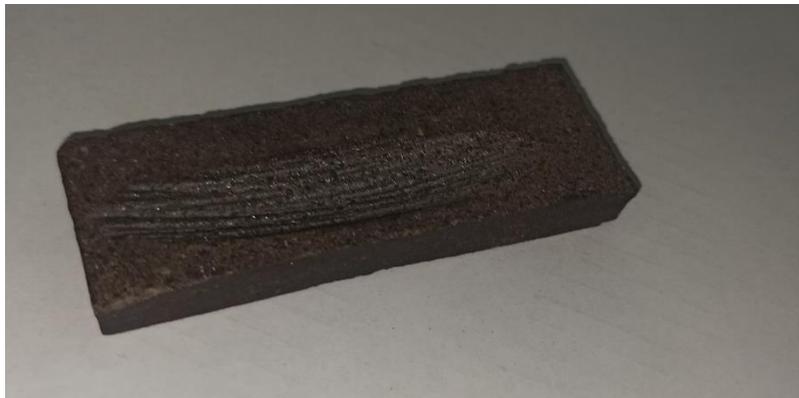
t	Valores experimentales	Modelo propuesto
30	0,573	0,409940389
60	0,927	0,78415172
90	1,219	1,093104762
120	1,543	1,366084795
150	1,767	1,615096228
180	1,922	1,846535221
210	2,149	2,064314297
240	2,317	2,271044306
270	2,461	2,468575798
300	2,584	2,65828001
330	2,71	2,841208311
360	2,857	3,018188955
390	3,007	3,189888972
420	3,141	3,356855469
450	3,291	3,519544157
480	3,54	3,678339666
510	3,753	3,833570349
540	3,95	3,985519323
570	4,11	4,134432857
600	4,33	4,28052684



ANEXO XI

Valores de desgaste experimentales y modelo propuesto con 150 N de carga (cerámica) y la probeta sobre la que se realizó el ensayo

t	Valores experimentales	Modelo propuesto
30	0,586	0,519376996
60	1,021	1,081301853
90	1,381	1,506280828
120	1,726	1,861249462
150	2,044	2,171845071
180	2,33	2,451117186
210	2,622	2,706773138
240	2,88	2,943811065
270	3,123	3,165688864
300	3,34	3,374915509
330	3,533	3,573379282
360	3,73	3,762543172
390	3,926	3,943567725
420	4,122	4,117391771
450	4,317	4,284787419
480	4,471	4,446398688
510	4,605	4,602769351
540	4,719	4,754363458
570	4,851	4,901580765
600	4,958	5,044768517



ANEXO XII

Disco recubierto, comprobación de la velocidad del equipo y ensayo en el equipo de la normativa ASTM G-65

