



# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

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

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

**TEMA: “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.”**

**AUTORES: DAYANA SALOME ALVAREZ MEJIA  
PABLO ANDRES NARVAEZ SIMBAÑA**

**DIRECTOR: ING. CARLOS MARCELO SEGOVIA TROYA Msc.**

**Ibarra, 2020**

## CERTIFICADO

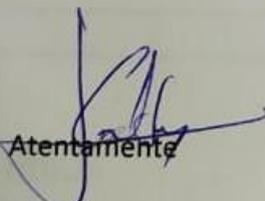
### ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR

En calidad de director del plan de trabajo de grado, previo a la obtención del título de Ingeniería en Mantenimiento 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 "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" presentado por: Narvárez Simbaña Pablo Andrés con el número de cedula 100310424-5 y Dayana Salomé Álvarez Mejía con el número de cedula 100307239-2, 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 07 días del mes de febrero del 2020

  
Atentamente

Ing. Carlos Segovia MSc.

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:	1003072392-2		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Álvarez Mejía Dayana Salomé		
DIRECCIÓN:	Ibarra, José Nicolas Hidalgo 5-35 y Pasquel Monge		
E-MAIL:	dsalvarezm@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	2959778	TELÉFONO MÓVIL	988270381

CÉDULA DE IDENTIDAD:	100310424-5		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Narváez Simbaña Pablo Andrés		
DIRECCIÓN:	Atuntaqui, Barrio Sto. Domingo, Calle Celiano Aguinaga 15-97 y Pasaje Buena Fe		
E-MAIL:	panarvaezs@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	2909209	TELÉFONO MÓVIL:	987789899

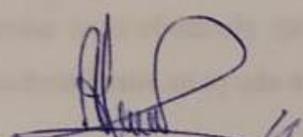
DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	ANÁLISIS DEL DESGASTE POR ABRASIÓN DEL MATERIAL DE LAS PASTILLAS DE FRENO DE VEHÍCULOS LIVIANOS DISPONIBLES EN EL MERCADO MEDIANTE ENSAYOS BASADOS EN LA NORMA TÉCNICA ASTM G-65 PARA DETERMINAR SU NIVEL DE DESGASTE
AUTOR (ES):	Dayana Salomé Álvarez Mejía, Pablo Andrés Narváez Simbaña
FECHA:	07 de febrero del 2020
<b>SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO</b>	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSTGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ
ASESOR/DIRECTOR:	Ing. Carlos Segovia Msc.

## 2. CONSTANCIA

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

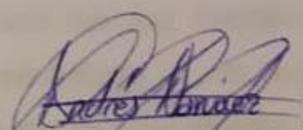
Ibarra, a los 07 días del mes de febrero del 2020

### AUTORES:



Dayana Salomé Álvarez Mejía

1003072392



Pablo Andrés Narváez Simbaña

100310424-5

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo está dedicado a mis padres quienes siempre han estado a mi lado apoyándome en todas mis metas, quienes han sabido guiarme y hacer de mí una mejor persona, siendo mi fuente de motivación día tras día.

A mis queridos abuelitos por ser un gran ejemplo en mi vida, por su sacrificio, amor, sabiduría, comprensión y apoyo en todo momento.

A toda mi familia y amigos quienes con sus palabras y compañía me han impulsado a superar cada obstáculo que se presenta en mi vida y ser quienes siempre estuvieron listos para brindarme su ayuda en los buenos y malos momentos.

***SALOMÉ ÁLVAREZ***

El presente proyecto de investigación lo dedico de la manera más especial a mis padres quienes me han brindado su apoyo incondicional con amor, paciencia y esfuerzo permitiéndome en esta ocasión cumplir una meta más de las que me he planteado en la vida gracias a sus consejos y enseñanzas.

A la niña de mis ojos Jéssica, quien con amor, cariño y respeto ha logrado llenar de felicidad cada día de mi vida sabiendo comprenderme y apoyarme durante esta etapa académica.

A mis hermanos Marlon y Lesly quienes más que hermanos han sido mis mejores amigos y a pesar de nuestras diferencias han sabido incentivar en mí la fortaleza para seguir el camino del éxito.

***ANDRÉS NARVÁEZ***

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mis padres y abuelitos quienes me han acompañado y brindado su apoyo incondicional, además quiero expresar mi gratitud a la Universidad Técnica del Norte y a sus docentes que compartieron todos sus conocimientos en especial a mi director de tesis Ing. Carlos Segovia, pues con su experiencia y conocimientos ha sido un guía fundamental en el desarrollo del proyecto, además de demostrar ser una excelente persona.

***SALOMÉ ÁLVAREZ***

A Dios y en especial a la virgen del Quinche por brindarme la fortaleza y el valor para seguir adelante en mi carrera estudiantil y de vida superándome como persona.

A mi madre Dora quien a pesar de mis errores con su amor y comprensión siempre ha estado a mi lado apoyándome, aconsejándome y guiándome para superarme cada día más.

A mi padre Miguel quien a pesar de nuestras diferencias siempre ha estado presente con sus consejos compartiéndome sus experiencias y enseñándome el valor de la vida, la salud y el trabajo que son factores importantes para mejorar como persona.

Al amor de mi vida Jéssica quien ha sido un pilar importante en el desarrollo de este proyecto de investigación al incentivarme la dedicación y puntualidad durante su desarrollo.

A la Universidad Técnica del Norte en donde nos han impartido valores y conocimientos que me han permitido mejorar como persona y profesional, a los docentes de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Automotriz, en especial al Ing. Carlos Segovia Msc. director de tesis, Ing. Rommel Imbaquingo Msc. e ing. Edwin arroyo Msc. quienes han hecho posible el desarrollo de esta investigación.

***ANDRÉS NARVÁEZ***

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CAPÍTULO I</b>	1
<b>1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN</b>	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Situación Actual:	3
1.3 Prospectiva:	4
1.4 Planteamiento del Problema	4
1.5 Objetivos	5
1.5.1 Objetivo general	5
1.5.2 Objetivos específicos	5
1.6 Alcance	6
1.7 Justificación	7
1.8 Contexto	8
<b>CAPÍTULO II</b>	10
<b>2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	10
2.1 Sistema de frenos	10
2.1.1 Historia	10
2.1.2 Importancia	11
2.1.3 Tipos de frenos	11
2.1.3.1 Frenos de Tambor	12
2.1.3.2 Frenos de disco	12
2.1.4 Componentes de los frenos de disco	13
2.1.4.1 Discos	13
2.1.4.3 Pistones	15
2.1.4.4 Pastillas	15
2.1.5 Tipos de pastillas de frenos	16
2.1.5.1 Pastillas de frenos orgánicas	16
2.1.5.2 Pastillas de freno semimetálicas	17
2.1.5.3 Pastillas de freno metálicas	18
2.1.5.4 Pastillas de freno de carbono	18
2.1.5.5 Pastillas de freno cerámicas	18
2.1.6 Mantenimiento de las pastillas de frenos	19
2.2 Tribología	19
2.2.1 Tipos de desgaste	20
2.2.1.1 Desgaste por abrasión	21
2.2.1.2 Desgaste por fatiga superficial	22
2.3 Norma ASTM G-65	24
2.3.1 Características de la máquina	25
2.3.2 Parámetros de ensayo	28
2.3.2.1 Procedimiento A	29
2.3.2.2 Procedimiento B	29
2.3.2.4 Procedimiento C	29
2.3.2.5 Procedimiento D	29
2.3.2.6 Procedimiento E	30
<b>CAPÍTULO III</b>	31
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	31
3.1 Elementos mecánicos	31

3.1.1 Brazo y porta probeta	31
3.1.1.1 Diagrama de cuerpo libre del brazo de palanca	31
3.1.1.2 Cálculos	32
3.1.1.3 Selección del material del brazo de palanca y porta probeta	36
3.1.1.4 Diseño	37
3.1.2 Sistema de llenado	42
3.1.2.1 Tolva	38
3.1.2.2 Boquilla	42
3.1.3 Eje de transmisión	45
3.1.3.1 Cortante máximo y Momento flector máximo	47
3.1.3.2 Factor de modificación de la condición superficial.	49
3.1.3.3 Factor de modificación de tamaño	50
3.1.3.4 Factor de modificación de carga	51
3.1.3.5 Factor de modificación de temperatura	51
3.1.3.6 Factor de Modificación de efectos diversos	52
3.1.3.7 Limite de resistencia a la fatiga	52
3.1.4 Disco	55
3.1.5 Estructura	57
3.2 Elementos eléctricos	59
3.2.1 Moto-reductor eléctrico	59
3.2.2 Variador de frecuencia	60
3.3 Elementos de programación	61
<b>CAPÍTULO IV</b>	<b>63</b>
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>63</b>
4.1 Pruebas de los elementos de la máquina	63
4.1.1 Comprobación de flujo de arena	63
4.1.2 Comprobación del disco recubierto	63
4.1.3 Comprobación de las rpm del motor	64
4.2 Preparación de las probetas	64
4.3 Determinación del procedimiento a utilizar	65
4.4 Proceso de funcionamiento	67
4.5 Ensayos a las probetas	68
4.6 Interpretación de datos	79
4.6.1 Pastillas metálicas	81
4.6.2 pastillas de asbesto	82
4.6.3 Pastillas de cerámica	82
4.7 Validación de los resultados	83
4.7.1 Pastillas de asbesto	83
4.7.2 Pastillas de Carbón	88
4.7.3 Pastillas metálicas	92
4.7.4 Pastillas cerámicas	97
<b>CAPITULO V</b>	<b>104</b>
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>104</b>
5.1 Conclusiones	104
5.2 Recomendaciones	105
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>106</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>111</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA NUM.	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
2.1	Discos de tambor en el Cadillac Type 51	11
2.2	Freno de tambor	12
2.3	Freno de Disco	13
2.4	Disco de freno	14
2.5	Tipos de mordaza	15
2.6	Pastilla de freno	16
2.7	Estructura de la pastilla de freno	16
2.8	Desgaste abrasivo entre dos y tres cuerpos	22
2.9	Desgaste por fatiga	23
2.10	Desgaste por corrosión en frenos	24
2.11	Desgaste por adhesión	24
2.12	Esquema de la máquina de ensayos de desgaste por abrasión según Norma ASTM G-65	25
2.13	Rueda y brazo de palanca	27
2.14	Balanza analítica	28
2.15	Caja de la máquina	28
3.1	Diagrama de cuerpo libre brazo de palanca	31
3.2	Diagrama de cuerpo libre de esfuerzos cortantes en el pasador del pivote	33
3.3	Esfuerzos cortantes de un perno	34
3.4	Especificaciones de resistencia de pernos acerados en milímetros	35
3.5	Dimensiones propuestas para el brazo de palanca por la Norma ASTM G-65	36
3.6	Vista 3D del brazo de palanca	37
3.7	Vista 3D de la porta probetas	37
3.8	Dimensiones del tronco del cono de la tolva	40
3.9	Dimensiones del cilindro de la tolva	41
3.10	Tolva diseñada en SolidWorks	42
3.11	Diseño de la boquilla de acuerdo a la norma ASTM G65	43
3.12	Dimensiones para la fabricación del elemento 1 de la boquilla	43
3.13	Dimensiones para la fabricación del elemento 2 de la boquilla	44
3.14	Boquilla diseñada en SolidWorks	44
3.15	Diagrama de fuerzas que actúan sobre el eje de transmisión	45
3.16	Diagrama de fuerza cortante máxima	48
3.17	Diagrama del momento flector máximo	48
3.18	Vista frontal del eje de transmisión	54
3.19	Disco de acero recubierto por caucho de goma	55
3.20	Especificaciones químicas del acero AISI 1018	56
3.21	Especificaciones químicas del acero AISI 1018 laminado en caliente	56
3.22	Estructura de la máquina de desgaste abrasivo vista frontal	58
3.23	Estructura de la máquina de desgaste abrasivo vista lateral	58
3.24	Estructura de la máquina de desgaste abrasivo vista 3D	59
4.1	Pesaje de las probetas	67
4.2	Dimensionamiento de la probeta	69
4.3	Pastilla de freno de cerámica no uniforme	70

<b>4.4</b>	Vaso de precipitación con un volumen de 225 ml de agua	70
<b>4.5</b>	Pastilla de freno sumergida en el vaso de precipitación	71
<b>4.6</b>	Desgaste sufrido en la probeta de asbesto y carbón respectivamente	75
<b>4.7</b>	Desgaste sufrido en la probeta de cerámica	76
<b>4.8</b>	Desgaste sufrido en la pastilla de freno metálica	77
<b>4.9</b>	Análisis en barras del volumen perdido de cada material expresado en $\text{cm}^3$	79
<b>4.10</b>	Porcentaje de desgaste de cada tipo de pastilla de freno	81
<b>4.11</b>	Gráfico cajas y bigotes pastillas de freno de asbesto	84
<b>4.12</b>	Histograma de las pastillas de freno de asbesto	85
<b>4.13</b>	Diagrama de Tallo y Hoja de las pastillas de freno de asbesto	86
<b>4.14</b>	Gráfico de cuantiles de las pastillas de freno de asbesto	86
<b>4.15</b>	Curva de potencia de pastillas de asbesto	87
<b>4.16</b>	Gráfico de cajas y bigotes de pastillas de freno de carbón	88
<b>4.17</b>	Histograma de las pastillas de freno de carbón	89
<b>4.18</b>	Diagrama de Tallo y Hoja de las pastillas de freno de carbón	90
<b>4.19</b>	Gráfico de cuantiles de las pastillas de freno de asbesto	90
<b>4.20</b>	Curva de potencia de pastillas de asbesto	91
<b>4.21</b>	Gráfico de caja y bigotes de las pastillas de freno metálicas	92
<b>4.22</b>	Histograma para la pérdida de volumen de las pastillas de freno metálicas	94
<b>4.23</b>	Diagrama de Tallo y Hoja para: unidad = 0,01 $\sqrt{2}$ representa 0,12	94
<b>4.24</b>	Gráfico de probabilidad normal de las pastillas de freno metálicas	95
<b>4.25</b>	Gráfico de Cuantiles de la pérdida de volumen de las pastillas de freno metálicas	95
<b>4.26</b>	Curva de potencia para la prueba de hipótesis de las pastillas de freno metálicas	97
<b>4.27</b>	Gráfico de caja y bigotes para la pérdida de volumen de las pastillas cerámicas	98
<b>4.28</b>	Histograma para la pérdida de volumen de las pastillas cerámicas	100
<b>4.29</b>	Diagrama de tallo y hoja para la pérdida de volumen de las pastillas cerámicas	100
<b>4.30</b>	Gráfico de probabilidad normal para la pérdida de volumen de las pastillas cerámicas	101
<b>4.31</b>	Gráfico de Cuantiles para la pérdida de volumen de las pastillas cerámicas	101
<b>4.32</b>	Curva de potencia para la prueba de hipótesis de las pastillas cerámicas	103

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>TABLA NUM.</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PÁGINA</b>
2.1	Especificaciones del abrasivo utilizado en ensayos según norma ASTM G-65	26
2.2	Parámetros de ensayo según norma ASTM G-65	28
3.1	Parámetros de ensayo según norma ASTM G-65	31
3.2	Propiedades mecánicas del acero AISI 1018	45
3.3	Coefficientes para el cálculo del factor de modificación de la condición superficial	50
3.4	Factores de modificación de carga para ejes	51
3.5	Factores de modificación de temperatura a diferentes temperaturas	52
3.6	Propiedades mecánicas de los cauchos CIIR y NBR 60	57
4.1	Pruebas de comprobación del flujo de arena	63
4.2	Pruebas realizadas al disco recubierto	64
4.3	Comprobación de las RPM del motor	64
4.4	Dimensiones de las probetas	65
4.6	Rango de resistencia	65
4.5	Valoraciones de los componentes de las pastillas de freno	66
4.7	Análisis del procedimiento a utilizar	66
4.8	Masa inicial de las pastillas de freno	68
4.9	Masa promedio de las pastillas de freno	72
4.10	Masa, volumen y densidad de las pastillas de freno	73
4.11	Cálculo de masa pérdida de las pastillas de asbesto	74
4.12	Cálculo de masa pérdida de las pastillas de carbón	75
4.13	Cálculo de masa pérdida de las pastillas de cerámica	76
4.14	Cálculo de masa pérdida de las pastillas metálicas	77
4.15	Resultados expresados en pérdida de masa y de volumen	78
4.16	Promedio de volumen perdido de las diferentes pastillas de freno	79
4.17	Resumen estadístico de las pastillas de asbesto	84
4.18	Tabla de frecuencias de pastillas de freno de asbesto	85
4.19	Resumen estadístico de las pastillas de carbón	88
4.20	Tabla de frecuencias de pastillas de freno de carbón	89
4.21	Condiciones de la prueba de hipótesis	92
4.22	Resumen estadístico para la pérdida de volumen de las pastillas metálicas	92
4.23	Tabla de Frecuencias para la pérdida de volumen de las pastillas metálicas	93
4.24	Condiciones de la prueba de hipótesis	97
4.25	Resumen estadístico para la pérdida de volumen de las pastillas cerámicas	98
4.26	Tabla de frecuencias para la pérdida de volumen de las patillas cerámicas	99

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>ECUACIÓN NUM.</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PÁGINA</b>
<b>3.1</b>	Sumatoria de momentos en un punto	32
<b>3.2</b>	Cálculo de peso	32
<b>3.3</b>	Teorema de Pitágoras	34
<b>3.4</b>	Esfuerzo cortante de un perno	34
<b>3.5</b>	Flujo másico	38
<b>3.6</b>	Densidad	39
<b>3.7</b>	Volumen de tronco de cono de la tolva	40
<b>3.8</b>	Volumen del cilindro de la tolva	41
<b>3.9</b>	Fuerza de rozamiento en un punto	47
<b>3.10</b>	Torque en un punto	47
<b>3.11</b>	Momento flector	48
<b>3.12</b>	Resistencia a la fatiga	49
<b>3.13</b>	Factor de modificación de la condición superficial.	50
<b>3.14</b>	Factor de modificación de tamaño	51
<b>3.15</b>	Límite de resistencia a la fatiga	53
<b>3.16</b>	Cálculo del diámetro del eje	53
<b>3.17</b>	Cálculo de número de polos del motor	60
<b>4.1</b>	Cálculo de la densidad de las pastillas de freno	69
<b>4.2</b>	Cálculo del volumen de las pastillas de freno	69
<b>4.3</b>	Cálculo de la densidad de las pastillas de freno cerámicas	71
<b>4.4</b>	Cálculo de la masa promedio de las pastillas de freno	72
<b>4.5</b>	Cálculo del volumen perdido de las pastillas de freno	73
<b>4.6</b>	Cálculo del porcentaje de desgaste de las pastillas de freno	80

## ÍNDICE DE ANEXOS

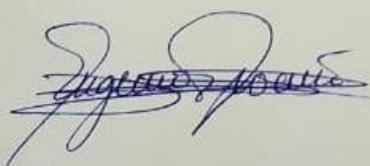
<b>ANEXO NUM.</b>	<b>PÁGINA</b>
I. Plano del elemento 1 de la boquilla	112
II. Plano del elemento 2 de la boquilla	113
III. Plano del ensamblaje de la boquilla	114
IV. Plano de la tolva	115
V. Plano de la estructura	116
VI. Plano del brazo	117
VII. Plano del eje	118
VIII. Plano de la porta probeta	119
IX. Plano del disco recubierto de caucho	120
X. Programación Arduino	121
XI. Memoria técnica	123

## RESUMEN

En este proyecto se propuso el diseño y construcción de una máquina para ensayos de desgaste abrasivo según la norma técnica ASTM G-65 con la finalidad de analizar la resistencia a la abrasión de las pastillas de freno de asbesto, metálicas, cerámicas y de carbón. Durante la preparación de este proyecto se tomó como referencia varias fuentes bibliográficas entre ellas la normativa ASTM G-65 que permitió establecer los parámetros de diseño como estructura, características y materiales utilizados en la construcción de la máquina, así como el procedimiento y el reporte de resultados obtenidos durante los ensayos realizados a cada tipo de material. Para la elaboración del diseño de la máquina se utilizó el software SolidWorks que permitió obtener un modelo previo de la máquina para su posterior construcción. Una vez finalizada la construcción de la máquina se procedió a comprobar que esta cumpla con los requerimientos establecidos por la norma ASTM G-65 para obtener resultados reales al realizar los ensayos en las pastillas de freno; posteriormente se preparó las probetas y se procedió a realizar las pruebas correspondientes. Para el análisis de resultados se procesó los datos obtenidos hasta lograr obtener el volumen perdido de cada probeta ensayada con la finalidad de manejar una sola variable en la realización de las pruebas de hipótesis para sustento de los resultados. Se pudo apreciar que las pastillas de freno que tuvieron mayor desgaste son las cerámicas seguidas por las de asbesto, carbón y metálicas dando una perspectiva definida para su posterior correlación con la aplicación de los vehículos ya sea de uso personal o de trabajo. Las pastillas metálicas ofrecen un mejor rendimiento de frenado en un rango más amplio de temperatura y condiciones extremas; sin embargo, tienden a ser ruidosas y se demoran en asentarse teniendo menor adherencia al inicio de la conducción. Las pastillas de asbesto se han dejado de utilizar debido a sus propiedades cancerígenas, sin embargo, se han analizado y se ha concluido que tienen una resistencia intermedia entre las pastillas de freno cerámicas y de carbón. Las pastillas de freno cerámicas son las menos resistentes, sin embargo, ofrecen una mejor conductividad térmica y eficiencia de frenado en condiciones extremas, así como la comodidad al ser silenciosas. Finalmente, las pastillas de carbón disponen de una resistencia media a la abrasión frente a las pastillas metálicas y cerámicas, en altas temperaturas mantienen una buena fricción y desempeño y generalmente son silenciosas lo que las hace las más usadas en el medio.

## ABSTRACT

The design and construction of a machine for abrasive wear tests according to the ASTM G-65 technical standard was proposed in order to analyze the abrasion resistance of asbestos, metal, ceramic and carbon brake pads. During the preparation of this project, several bibliographic sources were taken as a reference, including the ASTM G-65 regulations that allowed establishing the design parameters, such as structure, characteristics and materials used in the construction of the machine, as well as the procedure and the report of results obtained during the tests performed on each type of material. For the design of the machine, SolidWorks software was used, which allowed to obtain a previous model of the machine for its subsequent construction. Once the construction of the machine was completed, it was verified that it meets with the requirements established by ASTM G-65 technical standard to obtain real results when testing the brake pads; subsequently the specimens were prepared and the corresponding tests were carried out. For the analysis of the results, the data obtained was processed until the lost volume of each test specimen which was obtained in order to handle a single variable in the performance of the hypothesis tests to support the results. It was possible to appreciate that the brake pads that had greater wear are the ceramics followed by those of asbestos, coal and metal, giving a defined perspective for their subsequent correlation with the application of the vehicles; whether for personal or work use. Metal brake pads offer better braking performance over a wider range of temperature and extreme conditions; however, they tend to be noisy and take time to settle down, having less adhesion at the beginning of driving. Asbestos tablets have been discontinued due to their carcinogenic properties, however, they have been analyzed and it has been concluded that they have an intermediate resistance between ceramic and carbon brake pads. Ceramic brake pads are the least resistant, however, they offer better thermal conductivity and braking efficiency in extreme conditions, as well as comfort when they are silent. Finally, the carbon pads have a medium abrasion resistance against metal and ceramic pads, at high temperatures they maintain good friction and performance and are generally silent which makes them the most used in the environment.



## INTRODUCCIÓN

El sistema de frenos es uno de los principales sistemas de seguridad activa del vehículo y según la agencia pública de noticias del Ecuador y Sur América es el causante en conjunto con los daños mecánicos del 1% de los accidentes de tránsito.

La eficiencia de frenado depende principalmente del material y las propiedades de la almohadilla de la pastilla de freno teniendo en cuenta que es el componente sometido a fricción con el disco. El desconocimiento de la relación entre la aplicación del vehículo y el tipo de almohadilla de freno utilizada influye significativamente en el desempeño y duración de los componentes de este sistema.

Para dar solución a esta problemática se analiza el desgaste abrasivo de las pastillas de freno de asbesto, carbón, metálicas y cerámicas en una máquina construida según la norma técnica ASTM G-65 que establece ensayos de abrasión para diferentes tipos de materiales. Esta máquina permite determinar la resistencia de un material a la abrasión que se produce ante un disco recubierto por caucho de clorobutilo y un flujo laminar de arena de Ottawa.

El desgaste producido en las probetas se lo analiza en pérdida de volumen debido a la diferencia entre la densidad de los materiales obteniendo desgastes diferentes en cada material ensayado. Además, los resultados tienen un respaldo estadístico de pruebas de hipótesis realizadas con una muestra de 20 probetas por material.

Finalmente se realiza una comparativa de resistencia al desgaste con la finalidad de redactar una memoria técnica donde se correlacione los resultados obtenidos en los ensayos de acuerdo al desgaste de cada material con la aplicación de los vehículos ya sea de uso personal o de trabajo.

# CAPÍTULO I

## 1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

Un freno es un dispositivo que disminuye la velocidad de un cuerpo; en la mayoría de casos a través de la acción sobre un eje, absorbiendo energía cinética y disipándola en forma de calor (Montenegro Montero, Navarro Bejarano , & Rigioni Acuña, 2014, pág. 2). El estudio de este sistema es importante porque de él depende la seguridad al momento de conducir un vehículo siendo indispensable realizar los respectivos mantenimientos de las pastillas de freno y las zapatas evitando distancias de frenado extensas y derrapes indeseados que pueden ocasionar una gran variedad de accidentes.

Herbert Froot para 1987 implementó la primera pastilla de fricción que se fundamentaba en el uso de una trenza con fibra de algodón, Sin embargo, tenía la limitación de romperse a los 150 °C lo que llevó a la búsqueda de otro tipo de material con mejores propiedades mecánicas que permitan el desarrollo de una almohadilla para las pastillas de freno más eficiente.

El implemento de una fibra natural no llegó a ser sostenible por sus propiedades, por tal motivo en la búsqueda de nuevas alternativas se optó por el uso del amianto que posee una gran resistencia mecánica, flexibilidad, resistencia a la fricción, resistencia térmica y buena compatibilidad con otras sustancias (Ríos Molestina & Rivera Criollo, 2017, pág. 11). En la actualidad se puede encontrar pastillas de freno de cerámica, carbón, aleaciones metálicas, de asbestos siendo estas las menos usadas, entre otras que según su calidad determinan el perfil de frenado, su resistencia a altas temperaturas y la durabilidad de material de la almohadilla.

El estudio de la abrasión es un aspecto ampliamente aplicable en la industria, motivo por el cual el grupo de tribología de la Sección de Estudios de Postgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional en

México se dio la tarea de diseñar y construir equipos para realizar pruebas de desgaste abrasivo, adhesivo y erosivo a diferentes aceros y tratamientos superficiales con el objetivo de analizarlos tanto en ambientes secos como húmedos y determinar algunas propiedades tribológicas como la micro dureza y el desgaste, concluyéndose que los materiales son más propensos al desgaste en ambientes secos ya que en los húmedos el agua funciona como lubricante y refrigerante. De la misma manera los tratamientos superficiales ayudaron a disminuir el desgaste por abrasión debido a que mejoran las propiedades de los materiales estudiados.

El análisis de la resistencia al desgaste abrasivo de las pastillas de freno mediante máquinas de ensayo ha ido implementándose en distintos países del mundo; un ejemplo es Turquía donde se desarrolló un probador de fricción de pastillas de freno basado en la práctica SAE J661 que establece un procedimiento de laboratorio uniforme para asegurar e informar las características de fricción y desgaste de las almohadillas de freno (Hasan Öktema, 2018, págs. 299-305).

Por otro lado, en Luxemburgo se realizó el análisis del hierro dúctil graduado funcionalmente para pastillas de freno validándolo en un probador pin-disk obteniendo que la zona funcionalmente graduada reduce la sensibilidad al desgaste y a la temperatura de las probetas de hierro dúctil (M. Polajnar, 2017, págs. 85-94).

(Espinoza Ruiz, 2017, pág. 11) abordó temas relacionados al desgaste con el diseño mecánico eléctrico de un tribómetro para ensayos de resistencia al desgaste por abrasión en pastillas de frenos según la norma ASTM G-65 donde gracias a la valoración de los procedimientos de la norma y de los componentes de las pastillas de frenos de disco, se pudo encontrar una comparación numérica entre máquina de ensayos y probeta respecto al desgaste abrasivo.

(Montenegro Montero, Navarro Bejarano , & Rigioni Acuña, 2014, pág. 1) se enfocaron en el estudio de los materiales que componen las pastillas de freno estableciendo una comparativa de calidad para determinar la razón de desgaste equivalente y la degradación transitoria y permanente del coeficiente de fricción de las muestras con la diferencia que el diseño de este trabajo no se realiza basado en la normativa ASTM G-65.

## 1.2 SITUACIÓN ACTUAL

El desgaste por abrasión, se define como la remoción de material de un cuerpo cuando permanecen atrapadas partículas duras entre dos superficies en contacto que provocan el desprendimiento del material con menor dureza; este desgaste puede darse en estado seco o húmedo (Calero Calero & Carrera Guanoluisa, 2015, pág. 8). Para la acción frenado se someten a fricción dos superficies que son el disco y la pastilla de freno, esto provoca un desgaste abrasivo en las pastillas de freno debido a que están construidas por materiales más blandos que el disco.

La norma que rige sobre el análisis de desgaste para cualquier tipo de material ya sean metales, cerámicos o compuestos es la norma ASTM G-65 (Ríos Molestina & Rivera Criollo, 2017, pág. 9). Esta norma estudia el desgaste abrasivo en seco que significa desgastar el material en condiciones no húmedas permitiendo analizar su desgaste abrasivo.

Metal Matrix Composition (MMC) es un avance muy importante en la industria automotriz que presenta mejoras en sus propiedades físicas, mecánicas y tribológicas en comparación con los materiales monolíticos (Shanker, 2018, pág. 5864). El desarrollo y evolución del sistema de frenado a través de estos materiales se enfoca en objetivos como aumentar la eficiencia del vehículo, reducir peso y disminuir el consumo de combustible.

Actualmente, en el Ecuador se han realizado investigaciones similares en lo referente al desgaste abrasivo de las pastillas de freno, por ejemplo, en la Universidad San Francisco de Quito se ha realizado el diseño y construcción de un equipo de laboratorio de desgaste abrasivo según norma ASTM G-65, ASTM G-105 y ASTM B-611, sin embargo, este se realizó con la finalidad de analizar el desgaste abrasivo de diversos materiales sin relacionarlos al campo automotriz brindando un enfoque general de los materiales que están en constante interacción con la carrera de ingeniería mecánica e ingeniería en mantenimiento automotriz.

(Ríos Molestina & Rivera Criollo, 2017, pág. 8), se enfoca en la comparación de pastillas de freno nacionales con pastillas de freno de otros países. La valoración de un producto nacional

es compleja en el país, sin embargo, esta investigación aporta con los datos obtenidos en los ensayos exponiéndolos al público y contribuyendo al desarrollo tecnológico del país.

De la misma manera, ( Zambrano Santos & Viláñez Ponce , 2018, pág. 11) se enfocan en una comparación de dos muestras de pastillas de freno, con el fin de analizar su desgaste a diferentes alturas sobre el nivel del mar.

### **1.3 PROSPECTIVA**

El Ecuador cuenta con 1 965 538 vehículos livianos (Asociación de empresas automotrices del Ecuador, 2017). Con esto se puede evidenciar la gran magnitud de automóviles que se encuentran circulando en el país, los cuales deben realizar su correspondiente mantenimiento para su correcto funcionamiento. Una parte indispensable al momento de revisar el estado de los automóviles es la revisión del sistema de frenos por su participación en la seguridad activa del vehículo; el principal elemento de desgaste en este sistema son las pastillas de freno por lo que se tienen que reemplazar con el paso de tiempo.

Existe una gran variedad de almacenes de repuestos, en donde se puede encontrar pastillas de freno de diferentes marcas, materiales y precios, sin embargo, existe desconocimiento sobre las ventajas y desventajas que brindan cada una de ellas según el material que las compone ya sean cerámicas, de carbón, metálicas o de asbesto. Por esta razón, este trabajo de investigación busca analizar el desgaste abrasivo con una máquina de ensayos diseñada con parámetros especificados en la norma técnica ASTM G-65 de los materiales de las pastillas de freno, buscando determinar el tipo de pastilla más conveniente acorde al uso que se va a dar al vehículo tomando como referencia la seguridad y el confort del usuario al momento de la conducción.

### **1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Las pastillas de freno y los materiales de fricción utilizados en ellas son los componentes más importantes en el sistema de frenos que afectan la seguridad de conducción y el

rendimiento de frenado (Hasan Öktema, 2018, pág. 299). Una gran cantidad de accidentes de tránsito hoy en día son ocasionados por problemas relacionados con el sistema de frenos de los vehículos.

Los vehículos tienen diversas aplicaciones en el medio, siendo las principales el uso personal o de un servicio público, lo mismo que conlleva a la incógnita ¿Qué tipo de pastilla Según su resistencia al desgaste es más conveniente de acuerdo con el uso que se dará al vehículo?

El desconocimiento de los materiales y su resistencia al desgaste por abrasión de las pastillas de freno en los vehículos es muy notable en los propietarios, conductores y técnicos de vehículos porque al momento de realizar la compra de las pastillas de freno no tienen en cuenta sus propiedades mecánicas frente al desgaste por abrasión existente en la acción de frenado.

## **1.5 OBJETIVOS**

### **1.5.1 OBJETIVO GENERAL**

Analizar el desgaste por abrasión del material de las pastillas de freno de vehículos livianos disponibles en el mercado local mediante ensayos basados en la norma técnica ASTM G-65 para determinar su nivel de desgaste.

### **1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Realizar una investigación bibliográfica en documentos relacionados con el desgaste abrasivo de materiales según norma técnica ASTM G-65 con la finalidad de reunir información concisa y veraz que aporten a la investigación.
2. Diseñar y construir una máquina para ensayos de desgaste abrasivo tomando en cuenta los parámetros de diseño y construcción de la norma técnica ASTM G-65 que

permita realizar ensayos de abrasión a las almohadillas de freno.

3. Realizar ensayos de desgaste por abrasión en pastillas de freno de automóviles disponibles en el mercado local siguiendo los parámetros de ensayo establecidos por la norma técnica ASTM G-65 con la finalidad de obtener resultados reales para su posterior análisis e interpretación.
4. Elaborar una memoria técnica con los datos más relevantes de la investigación a través de un análisis y síntesis de la información que permita entender de manera clara la resistencia al desgaste abrasivo de las pastillas de freno.

## **1.6 ALCANCE**

El presente estudio pretende realizar pruebas de desgaste por abrasión a pastillas de freno de diferentes componentes como son: cerámicos, aleaciones metálicas, de asbesto y de carbón de vehículos que son diseñados para transportar hasta 12 pasajeros y no tienen un peso bruto superior a 2800 kilogramos.

Este trabajo se centrará en el diseño y creación de una máquina prototipo que permitirá recrear la manera en que el desgaste actúa en las pastillas de freno lo que ayudará al usuario a elegir qué tipo de pastilla desea usar tomando en cuenta sus propiedades mecánicas.

El diseño y metodología de ensayos se realizará de acuerdo a la norma ASTM G-65; la máquina dispondrá de un motor eléctrico de 1 hp que será encargado de proporcionar el movimiento; como transmisión mecánica estará un eje al que se acoplará un disco recubierto de una banda de goma con una dureza shore A-60 que girará a 200 rpm; se utilizará un reductor de engranajes con una relación de 10:1 que estará junto al motor; se tendrá un brazo el cual va a proveer la fuerza de empuje necesaria y portará a la probeta; Además se utilizará arena de Ottawa como material abrasivo la cual será colocada en un dispositivo que proporcionará un flujo laminar constante sobre la probeta y el disco entre 300 a 400 gramos/minuto.

Una vez obtenidos los datos se los analizará y se identificará las diferencias de cada pastilla sus ventajas y desventajas; con esto se elaborará una memoria técnica en la cual se tendrá plasmado todos los datos obtenidos, especificaciones, métodos y la manera de emplear la máquina de desgaste construida.

## 1.7 JUSTIFICACIÓN

La investigación es un ente importante en la educación por tanto en el plan nacional de desarrollo en la política 5.6 del objetivo cinco menciona “Promover la investigación, la formación, la capacitación, el desarrollo y la transferencia tecnológica, la innovación y el emprendimiento, la protección de la propiedad intelectual, para impulsar el cambio de la matriz productiva mediante la vinculación entre el sector público, productivo y las universidades” (SENPLADES, 2017, pág. 83). Este trabajo abarca el análisis del desgaste por abrasión de los materiales de pastillas de freno de vehículos disponibles en el mercado local que se validará con ensayos realizados en una máquina diseñada y construida según la norma técnica ASTM G-65.

En el Ecuador se distribuyen pastillas de freno nacionales e internacionales de diferentes marcas y materiales con el fin de satisfacer la demanda existente de acuerdo a las necesidades de los clientes; sin embargo, al momento de adquirirlas ellos no disponen del conocimiento acerca de la calidad en cuanto a propiedades mecánicas que tienen estos elementos.

Existen máquinas para ensayo de desgaste abrasivo para diferentes materiales entre ellos el acero, el hormigón, también en nuestro país se han realizado ensayos de desgaste abrasivo en pastillas de freno de motocicletas y para realizar comparativas entre pastillas nacionales e internacionales.

En la máquina de abrasión para ensayos en acero el principio básico es hacer incidir un flujo de arena de cuarzo contra una probeta que es expuesta al contacto con un disco recubierto de una capa exterior de caucho preferiblemente de clorobutilo que envuelve su periferia (Calero Calero & Carrera Guanoluisa, 2015, pág. 2). En este caso la máquina se utilizará en pastillas de freno y como material abrasivo se utilizará la arena de Ottawa.

También se pretende contribuir con una memoria técnica que esté disponible para la sociedad entre ellos técnicos, productores, distribuidores y personas particulares, permitiéndoles adquirir los resultados obtenidos en los ensayos a realizarse y que al momento de producir, ofertar y adquirir las pastillas de freno para cada vehículo se realice una mejor elección de las mismas de acuerdo a sus propiedades mecánicas que influyen directamente en su desgaste, el cual será diferente según el uso dado al vehículo. Al estar disponibles estos resultados para todos se quiere contribuir con el objetivo 5 del plan nacional de desarrollo 2017-2021-Toda una Vida que menciona “Impulsar la productividad y competitividad para el crecimiento económico sostenible de manera redistributiva y solidaria” centrándose en la política 5.2 que se enfoca en “Promover la productividad, competitividad y calidad de los productos nacionales, como también la disponibilidad de servicios conexos y otros insumos, para generar valor agregado y procesos de industrialización en los sectores productivos con enfoque a satisfacer la demanda nacional y de exportación” (SENPLADES, 2017, pág. 83). Ante esto se busca incentivar a la producción, comercialización y adquisición de pastillas de freno de calidad en el entorno nacional al tener en cuenta estos resultados en todos los procesos productivos y comerciales por los que pasan estos elementos.

## **1.8 CONTEXTO**

En 2013 fallecieron casi 2.000 personas y se registraron 173 047 accidentes de tránsito en Ecuador; el 97% por fallas humanas de acuerdo con un informe estadístico de la Federación Internacional del Automóvil (FIA) (Agencia Pública de Noticias del Ecuador y Suramérica, 2014). Se puede evidenciar que la mayoría de los accidentes son provocados por la imprudencia de los conductores esto puede ser por causas como manejar en estado de embriaguez, invadir los carriles, así como irrespeto a las señales de tránsito.

En un porcentaje ínfimo (2%) las causas están relacionadas con mal estado de la vía, factores climáticos, fallas de iluminación u obstáculos en la vía, un 1% de los accidentes se debe a daños mecánicos y frenos (Agencia Pública de Noticias del Ecuador y Suramérica, 2014). Es imprescindible realizar el mantenimiento al sistema de frenos que es el encargado de disminuir la velocidad del vehículo cuando el conductor lo requiera. El desgaste de los forros

de las pastillas de freno y su cambio dependerá del material que esté compuesta, del modo de conducción y los lugares habituales por donde transita.

Existe gran variedad de repuestos automotrices y se puede encontrar pastillas de freno de distintos fabricantes para un mismo vehículo. Si bien es cierto son funcionales, y además para su fabricación se rigen mediante normas de calidad, no se puede estar seguro de la diferencia entre una y otra marca de pastillas sino es de la forma experimental (Espinoza Ruiz, 2017, pág. 11). Es por ello que se han realizado algunos estudios relacionados con el desgaste que sufren los diversos materiales.

(Velasquí Carrillo, 2015, pág. 5) analiza la seguridad que proporciona el sistema de frenos enfocándose especialmente en las pastillas comparando su eficiencia de frenado en pruebas con diferentes materiales y obtuvo como resultado que las pastillas de aleación metálica tienen superior eficiencia de frenado que pastillas compuestas de cerámica y carbono; esto debido a que tienen compuestos que aumentan el coeficiente de fricción.

( Zambrano Santos & Viláñez Ponce , 2018, pág. 11) se plantearon el objetivo de hacer conocer a los lectores la variación de desgaste que sufren las pastillas a diferentes alturas y se obtuvo como conclusión que el desgaste se incrementa en un pequeño porcentaje cuando se encuentra a nivel del mar con respecto a los 2500 metros de altura esto debido a su temperatura, salinidad en el ambiente y su humedad.

En particular, se han realizado algunos estudios relacionados al desgaste por abrasión y regido por la norma ASTM G-65; estas investigaciones nos permiten conocer a mayor profundidad cómo se comporta el desgaste en diversos materiales y en este caso en diferentes tipos de pastillas de freno.

## CAPÍTULO II

### 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 SISTEMA DE FRENOS

##### 2.1.1 HISTORIA

El uso del sistema de frenos viene desde mucho antes del imperio romano en donde se utilizaba una palanca con un bloque de madera en un extremo para poder reducir la velocidad de los carruajes (Ayala Yandún, 2018, pág. 75). Los carruajes eran halados por caballos y muchas veces no bastaba con decirles a los mismos que paren para detener el carruaje; por tal motivo se vio la necesidad de implementar un sistema que detenga la rueda de madera, sin embargo, la tecnología de la antigüedad no permitía tener un sistema de frenos muy eficiente ya que requerían de una gran fuerza producida por el conductor para detener parcial o totalmente el movimiento del vehículo.

El desarrollo y la evolución del sistema de frenos empezó a finales del siglo XIX y principios del siglo XX con la invención de los frenos de tambor y de disco. Ransom Eli Olds, un norteamericano pionero en la industria automovilística de principios del siglo XX diseña el primer freno de tambor (Alzallú Soriano, 2016, pág. 76). Este freno estaba formado por dos cintas de acero que abrazaban unos tambores que giraban en conjunto con las ruedas con el fin de detener las ruedas del vehículo; sin embargo, este presentaba un desgaste prematuro debido a su exposición con las impurezas del medio en el que se desenvolvían.



**Figura 2.1** Discos de tambor en el Cadillac Type 51  
(Alzallú Soriano, 2016, pág. 77)

El Cadillac Type 51 del año 1915 mostrado en la figura 2.1 presumía de equipar zapatas internas además de externas e incluso con un dispositivo que hacía las veces de freno de mano o de estacionamiento (Alzallú Soriano, 2016, pág. 76). Este sistema se lo utiliza hasta la actualidad solo que se han suprimido las bandas externas y se ha añadido sistemas hidráulicos auxiliares.

Por otro lado, el freno de disco fue inventado en Estados Unidos, sin embargo, este no marco relevancia en este país porque el freno de tambor se utilizó casi por 70 años. En 1902 el británico Frederick Lanchester obtuvo la patente de lo que sería el freno de disco moderno (Alzallú Soriano, 2016, pág. 78). Desde entonces este tipo de freno también se ha ido desarrollando de tal manera que en la actualidad es el más utilizado en los vehículos de turismo tanto para la parte delantera y posterior. En la actualidad este sistema se lo ha ido fusionando con sistemas auxiliares como el sistema ABS, ESP entre otros que complementan la función de controlar y estabilizar el movimiento del vehículo.

### **2.1.2 IMPORTANCIA**

El propósito principal de los frenos es disminuir la velocidad del vehículo para hacerlo controlable o detenerlo en una distancia razonable y bajo cualquier tipo de condiciones (Menéndez., 2002, pág. 2).

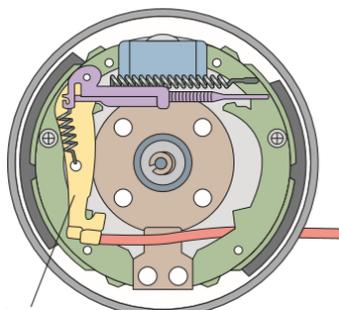
El vehículo como cualquier otro tipo de transporte necesita un sistema de frenado que permita disminuir parcial o totalmente su velocidad, por tal razón este sistema debe estar diseñado para soportar condiciones de trabajo exigentes acordes a las posibles velocidades que pueda tomar el vehículo en los distintos tipos de carreteras existentes siendo autopistas, adoquinados, empedrados o de lastre indistintamente de su accionamiento.

### **2.1.3 TIPOS DE FRENOS**

En el medio automotriz podemos encontrar dos tipos de frenos que son: los de tambor que vienen a ser los primeros que se usaron y los frenos de disco. Además, en la actualidad con

el fin de mejorar la eficiencia de cada uno se los ha ido implementando en conjunto con diversos sistemas que ayudan a su propósito.

### 2.1.3.1 Frenos de Tambor



**Figura 2.2** Freno de tambor  
(Borja, Fenoll, & Seco, 2009, pág. 178)

Los frenos de tambor son aquellos que realizan el frenado gracias a la fricción producida entre el tambor y las zapatas (Borja, Fenoll, & Seco, 2009, pág. 175). Este tipo de freno se utiliza generalmente en los frenos posteriores de los vehículos enfocando como función principal el accionar del freno de mano como se muestra en la figura 2.2.

El freno de tambor absorbe el 30% de la energía cinética producida por el movimiento del vehículo (García León, 2015, pág. 54). Por esta razón este tipo de freno solamente se lo considera como freno complementario por su acción mínima en la frenada.

### 2.1.3.2 Frenos de disco



**Figura 2.3** Freno de Disco  
(Borja, Fenoll, & Seco, 2009, pág. 164)

Los frenos de disco son aquellos que absorben generalmente el 70% de la energía cinética producida en el movimiento (García León, 2015, pág. 54). Como se indica en la figura 2.3 estos frenos son los más utilizados actualmente en las ruedas delanteras de los vehículos; Sin embargo, también en algunos modelos de vehículos de ciertas marcas se está implementando este sistema en los frenos posteriores.

El funcionamiento de los frenos de disco se basa en la fricción de dos cuerpos distintos: el disco y las pastillas de freno (Borja, Fenoll, & Seco, 2009). La fricción entre estos dos componentes depende de la fuerza ejercida por una bomba hidráulica que envía energía a través de un fluido hacia un émbolo que empuja la pastilla de freno para que friccionen con el disco.

Los frenos de disco frente a los frenos de tambor presentan las ventajas que se detallan a continuación:

1. Mayor Fuerza de frenado,
2. Mayor estabilidad,
3. Mejor disipación de calor y
4. Menor cantidad de componentes.

## 2.1.4 COMPONENTES DE LOS FRENOS DE DISCO

### 2.1.4.1 Discos



**Figura 2.4** Disco de freno  
(Tablero, 2014, pág. 1)

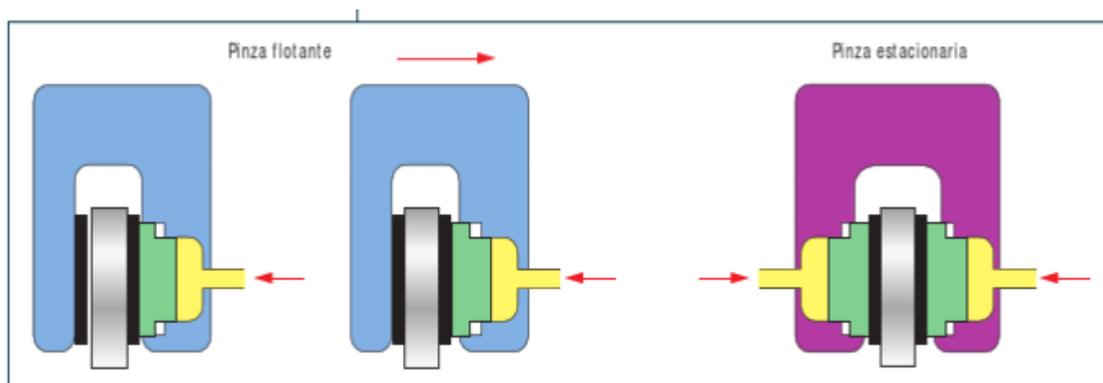
Los discos son elementos fabricados de acero aleado con cromo, ya que deben soportar elevadas temperaturas sin sufrir deformaciones (Borja, Fenoll, & Seco, 2009). Además del acero aleado generalmente se solían fabricar de hierro fundido y podemos encontrar discos ventilados como se muestra en la figura 2.4 y no ventilados como clasificación principal.

#### 2.1.4.2 Mordazas

La mordaza también denominada cáliper o pinza es el elemento que empuja mediante uno o varios pistones las pastillas para que friccionen con el disco (Borja, Fenoll, & Seco, 2009, pág. 174). Este elemento va directamente atornilladas a la base de la rueda.

Existen principalmente dos tipos de mordazas las cuales son: flotantes y fijas.

Las mordazas fijas cuentan con dos o más pistones y al momento de realizar la acción de frenado los pistones hacen que las pastillas ejerzan la presión a ambas caras del disco. Este tipo de pinza es de diseño muy sólido y por lo general es usado en vehículos rápidos y pesados. El número de pistones dependerá del peso y de la potencia del vehículo (Borja, Fenoll, & Seco, 2009, pág. 174).



**Figura 2.5.** Tipos de mordaza  
(Borja, Fenoll, & Seco, 2009, pág. 174)

Las mordazas flotantes son las más comunes debido a su menor precio y complejidad, como se muestra en la figura 2.5 estas poseen un solo pistón el cual al ser accionado presiona la

pastilla de freno contra el disco y esto a la vez provoca una fuerza de reacción la cual hace que se desplace la mordaza y presione la otra pastilla contra el disco de freno.

### 2.1.4.3 Pistones

Estos tienen un sistema de sellado lo cual permite que se mantenga la presión ocasionada por el líquido de frenos dentro del sistema. Para lograr el frenado la mordaza posee conductos por donde permiten el paso del líquido de frenos el cual activa al cilindro provocando que las pastillas se desplacen hacia el disco logrando así un frenado efectivo.

### 2.1.4.4 Pastillas



**Figura 2.6.** Pastilla de freno  
(Borja, Fenoll, & Seco, 2009, pág. 173)

Son uno de los elementos de fricción que posee el sistema de frenos de disco. Como se muestra en la figura 2.6 disponen forros de fricción de una composición muy similar a la de los forros de un disco de embrague, poseen unas virutas de un componente metálico que tiene como misión proporcionar a la pastilla una mayor rigidez mecánica (Borja, Fenoll, & Seco, 2009, pág. 173).

Estas son de suma importancia al momento de requerir un frenado eficaz del vehículo por lo que se requiere que estas se encuentren en buen estado para evitar grandes distancias de frenado o prevenir un accidente.



**Figura 2.7.** Estructura de la pastilla de freno  
(Chrysoula, 2014, pág. 4)

Como se indica en la figura 2.7 las pastillas de frenos están compuestas generalmente de los materiales detallados a continuación:

1. Aglutinante encargado de mantener los componentes unidos de manera compacta formando un solo conjunto.
2. Materiales estructurales encargados de proporcionar fuerza; metal, vidrio, Kevlar, carbono,
3. Fibras cerámicas o naturales
4. Rellenos
5. Aditivos: abrasivos y lubricantes (Chrysoula, 2014, pág. 4).

## 2.1.5 TIPOS DE PASTILLAS DE FRENOS

En el mercado existen varios tipos de pastillas de freno que se detallarán a continuación para poder saber cómo se adaptan al disco de freno y poder brindar una buena fricción entre los dos elementos teniendo una frenada estable.

### 2.1.5.1 Pastillas de frenos orgánicas

Las pastillas de freno orgánicas se desarrollaron como una alternativa al amianto. Este tipo de pastillas son también conocidas como pastillas de freno NAO (no asbesto orgánico)

utilizan algunos materiales comunes como fibras, vidrio, carbón y Kevlar (Shi, 2016, pág. 20). Para la fabricación de este tipo de pastillas son utilizados tanto herramientas como materiales de costos inferiores a los utilizados en otros tipos de pastillas.

Se puede decir que tienen un buen coeficiente de fricción dependiendo de su uso además tienen como ventajas ser muy silenciosas, tener un gran resultado de fricción a bajas temperaturas y no causar ningún daño o deformidad en los discos o los tambores de freno, pero tenemos como desventaja el alto desprendimiento de polvillo de asbesto que genera manchas en los aros y tambores.

A principios de la década de 1980 se descubrió que era cancerígeno y que era capaz de cubrir la asbestosis y el mesotelioma (Gachoki & Kathenya, 2011, pág. 10). Sin embargo, el asbesto fue muy utilizado debido a que poseía excelentes propiedades como la capacidad de soportar elevadas temperaturas.

Estas almohadillas son aptas para conducir / viajar diariamente en muchos entornos (Shi, 2016, pág. 20). Sin embargo, ya no son tan frecuentes en el mercado debido a la presencia de otros tipos de pastillas con mejores propiedades y que no sean nocivas para la salud de las personas.

#### **2.1.5.2 Pastillas de freno semimetálicas**

Estas almohadillas consisten en alrededor del 40% de fibras metálicas y otros ingredientes que incluyen aglutinantes y lubricantes; también incluyen almohadillas basadas en carbono para su complementación.

Las almohadillas semimetálicas son fuertes, conducen el calor lejos de los rotores, generan ruido y son lo suficientemente abrasivos para aumentar el desgaste del disco (Gachoki & Kathenya, 2011, pág. 10).

Estas pastillas no son tan efectivas a bajas temperaturas porque demoran en acomodarse a la periferia y desgaste del disco.

### **2.1.5.3 Pastillas de freno metálicas**

Estas almohadillas están típicamente hechas de hierro, cobre, acero y grafito, todas juntas y unidas para formar el material de la almohadilla; las almohadillas son rentables y duraderas, también son buenas para transferir el calor generado por la fricción con los discos de freno (Gachoki & Kathenya, 2011, pág. 9)

Sin embargo, al ser de metal presentan la desventaja de ser muy duras por lo que causa desgaste prematuro en los discos de freno del vehículo, razón por la cual, son usualmente desplazadas por las pastillas de carbón o cerámicas. Tienen el problema de ser muy ruidosas, además de tener que presionar el pedal de freno con más fuerza para poder generar un buen agarre.

### **2.1.5.4 Pastillas de freno de carbono**

Son similares a las pastillas de freno cerámicas, pero con mejores propiedades como alta fricción, alta resistencia térmica, alta resistencia al desgaste y bajo peso, sin embargo, no son eficientes a bajas temperaturas y tienen un alto costo (material y fabricar) (Chrysoula, 2014, pág. 8).

### **2.1.5.5 Pastillas de freno cerámicas**

Estas almohadillas están hechas de compuestos cerámicos que son una composición de aproximadamente 15% de fibras de metal y otros ingredientes tales como aglutinantes y lubricantes, (Gachoki & Kathenya, 2011, pág. 10).

Tanto los rellenos como lubricantes que poseen estas pastillas contribuyen a disminuir la vibración y ruido por lo que se considera como ventajas que son silenciosas y tienen mayor capacidad de transferencia de calor debido al metal en forma de fibras que poseen, así también estas poseen un peso inferior en relación con otro tipo de pastillas.

### **2.1.6 MANTENIMIENTO DE LAS PASTILLAS DE FRENOS**

Es recomendable realizar una revisión de los frenos cada 15 000 a 20 000 kilómetros, o revisarse antes si el vehículo presenta algún inconveniente.

Algunas señales de la existencia de desgaste tanto en el disco como en las pastillas son:

1. Testigo del freno encendido en el tablero.
2. Presencia de ruidos cuando realiza la acción de frenado.
3. Existencia de vibraciones.
4. Se observa señales de sobrecalentamiento.
5. Grietas en el disco.
6. Poco material del forro de las pastillas.

El tipo de material del cual está fabricado el disco es importante al momento de un frenado seguro y eficaz porque su mala calidad puede provocar deterioro prematuro de la pastilla.

También es recomendable sustituir a tiempo los componentes de freno desgastados porque pueden provocar mayor desgaste a los otros componentes del sistema. Cuando se requiera cambiar o rectificar los discos de freno se deben reemplazar también las pastillas; por el contrario, al cambiar las pastillas no es indispensable cambiar también el disco si este se encuentra en buen estado.

## **2.2 TRIBOLOGÍA**

Una primera definición estudiando la etimología de la palabra Tribología que viene del griego y su raíz Tribo que significa frotamiento, por lo tanto, es la ciencia encargada del estudio del frotamiento ( León, 2013, pág. 11).

Podemos definir a la tribología como la ciencia y técnica que se encarga del estudio del rozamiento entre superficies en movimiento lo cual genera inconvenientes como el desgaste la fricción, la adhesión, etc.

### **2.1.5.1 Historia de la fricción y desgaste**

Tanto la fricción como el desgaste han sido de suma importancia desde el origen del planeta Tierra, por ejemplo, en la era de Piedra se empezó a conocer la fricción y de este modo se aprendió que se podía crear fuego a partir del rozamiento continuo de un pedazo de madera entre hojas secas lo cual fue un gran avance en esa época.

Con el paso del tiempo el hombre empezó a sentir la necesidad de reducir la fricción y el desgaste utilizándose así lubricantes como por ejemplo en el inicio se utilizó aceites animales, vegetales y agua.

Después de muchos lustros, Leonardo Da Vinci (1452-1519) genio del Renacimiento marco esa época con sus estudios relacionados con la tribología; con un gran talento, su trabajo consistió en el estudio científico de la fricción que ayudo a entender las leyes del desgaste y su naturaleza (Peña, 2002, pág. 4).

Entre los primeros investigadores de la fricción están Amontons (1699), Coulomb (1785), y Morin (1833) los cuales postularon que la fricción es debida al enclavamiento de las protuberancias mecánicas o asperezas en las superficies de los materiales en contacto, de esta manera se pudo explicar por qué la fuerza de fricción es proporcional a la carga e independiente del área de contacto ( León, 2013, pág. 16).

### **2.2.1 TIPOS DE DESGASTE**

El desgaste se define como la pérdida progresiva de material de las superficies que interactúan en relativo movimiento (Sardar, Santanu , & Debdulal , 2018, pág. 2).

Se ha determinado varios mecanismos de desgaste, sin embargo, entre los principales tenemos:

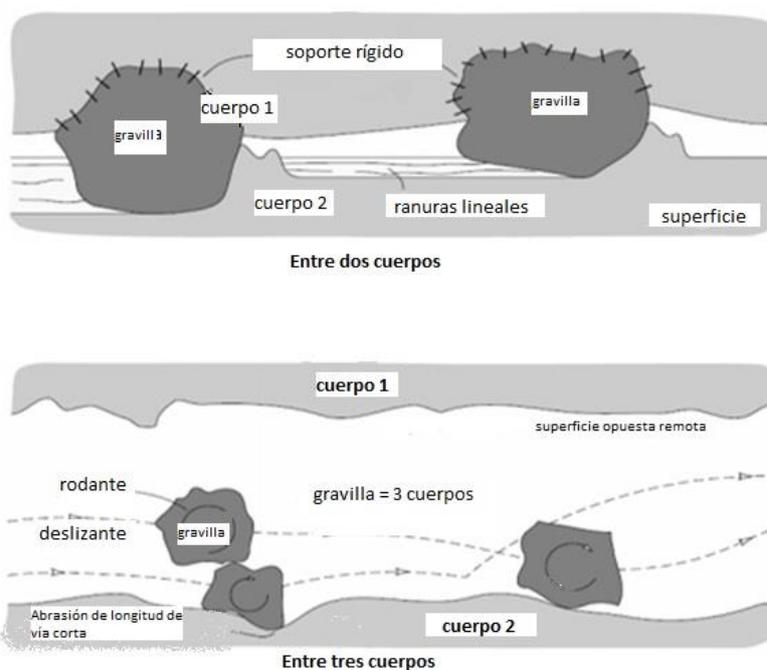
1. desgaste por abrasión,
2. fatiga,

3. adhesión y
4. corrosión.

El desgaste ha causado grandes problemas en la historia ya que acorta la vida útil de las diferentes máquinas o mecanismos por lo que es muy importante su análisis con la finalidad de aumentar la vida útil de los mismos.

### 2.2.1.1 Desgaste por abrasión

El desgaste abrasivo ocurre cuando las partículas duras o asperezas penetran en una superficie más suave mientras se deslizan a través de ella; por lo tanto, el desplazamiento del material en forma de virutas o residuos resulta en la pérdida de material (Sardar, Santanu , & Debdulal , 2018, pág. 2). Se puede decir que este desgaste se produce cuando un elemento sólido se encuentra en rozamiento con otro que posee igual o mayor dureza; cualquier material que posea partículas duras provoca desgaste abrasivo, aunque este se encuentre en menores proporciones, un ejemplo es el desgaste que sufren los aperos de maquinaria agrícola trabajando en la tierra y de la misma forma las pastillas de freno en contacto con el disco.



**Figura 2.8.** Desgaste abrasivo entre dos y tres cuerpos  
(Md, Mohd, K.M , & Z , 2016, pág. 4)

Como se muestra en la figura 2.8 se tiene dos tipos de desgaste abrasivo: desgaste entre dos cuerpos y desgaste entre tres cuerpos.

En el desgaste entre dos cuerpos las asperezas duras o los granos rígidamente retenidos pasan sobre la superficie como una herramienta de corte (Md, Mohd, K.M , & Z , 2016, pág. 3) siendo similar al uso de una lija en contacto con otro material.

En el desgaste abrasivo de tres cuerpos los granos son libres de rodar y deslizarse sobre la superficie ya que no se sostienen rígidamente. (Md, Mohd, K.M , & Z , 2016, pág. 3), el desgaste se produce por las partículas que se encuentran en libre movimiento; un ejemplo puede ser una trituradora de rocas.

### 2.2.1.2 Desgaste por fatiga superficial



**Figura 2.9.** Desgaste por fatiga  
(R, Vamsi , & Anthony, 2014)

El termino fatiga es aceptado generalmente como el tipo especial de daño causado por la acción repetida de esfuerzos cíclicos con una amplitud que alcanza valores por debajo del límite elástico del material ( Zambrano Santos & Viláñez Ponce , 2018, pág. 16). Entonces como se muestra en la figura 2.9 este es el resultado de varios esfuerzos cíclicos entre dos superficies que se encuentran en contacto entre ellas. Un factor de gran trascendencia es el coeficiente de fricción ya que si no se encuentran bien lubricadas estas superficies el desgaste

es superior llegando a producirse grietas tanto superficiales como subsuperficiales en los elementos.

### 2.2.1.3 Desgaste por corrosión



**Figura 2.10.** Desgaste por corrosión en frenos  
(Carroya.com, 2016, pág. 1)

Se da debido a las reacciones químicas donde el oxígeno reacciona con el medio ambiente como se muestra en la figura 2.10 que provoca el deterioro del material haciéndolo más frágil y reduciendo considerablemente su resistencia (Calero Calero & Carrera Guanoluisa, 2015, pág. 33). En este desgaste el material es degradado generando una pérdida de material.

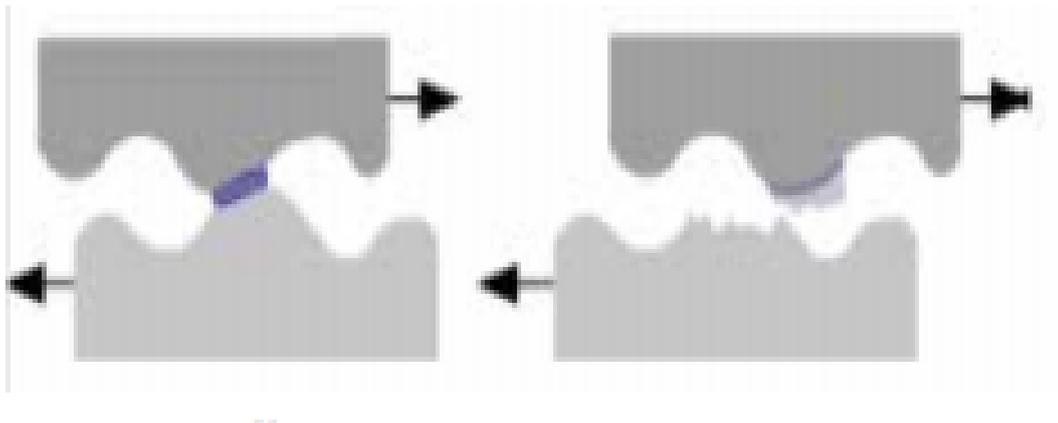
Este desgaste se lo puede analizar en dos etapas:

- 1.- Etapa de formación de la capa de óxido en la superficie que podría funcionar como lubricante pero no en todos los materiales ya que es una capa muy frágil.
- 2.- La película formada se encuentra en rozamiento entre ambas superficies donde finalmente es removida y causa desgaste.

### 2.2.1.4 Desgaste por adhesión

Ocurre por la destrucción de los enlaces de atracción que mantienen unidos a los átomos de las dos superficies en contacto cuando se aplica una fuerza para separar dichas superficies;

esto permite que parte del material arrancado del menos resistente se transfiera al otro de mayor resistencia así este gana mayor rugosidad (Calero Calero & Carrera Guanoluisa, 2015, pág. 33). El material que se desprende como resultado de este desgaste tiene forma de pequeñas partículas las cuales por lo general se adhieren a la otra superficie.



**Figura 2.11.** Desgaste por adhesión  
(R, Vamsi , & Anthony, 2014)

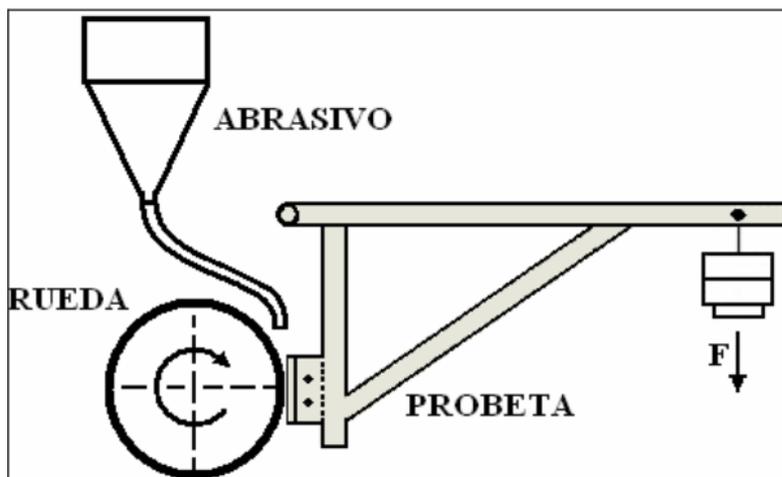
Como se observa en la figura 2.11 este desgaste es el resultado del daño de la superficie de uno o de ambos elementos que se encuentran en contacto.

La soldadura en frío se da cuando se excede el número de deformación del material, de este modo las asperezas creadas se deforman aumentando el área de contacto que soporta la carga aplicada.

### 2.3 NORMA ASTM G-65

Una norma ASTM es un documento que ha sido desarrollado y establecido dentro de los principios de consenso de la organización internacional que cumple los requisitos de los procedimientos y regulaciones de ASTM (Paredes Salinas & Pérez Quiroga, 2014, pág. 28).

Este tipo de normas para su creación permiten libre participación en el consenso de creación obteniendo una decisión consensuada global y se usan en el desarrollo de proyectos, sistemas de calidad y aceptación de productos y en investigaciones de ingeniería.



**Figura 2.12.** Esquema de la máquina de ensayos de desgaste por abrasión según Norma ASTM G-65 (ASTM, 2010, pág. 7)

Como se muestra en la figura 2.12 la norma ASTM G-65 plantea una estandarización del proceso de diseño, construcción y utilización de un equipo conocido como máquina para la medición del desgaste por abrasión (Niebles Núñez, Quesada, Santamaria, Méndez Muñoz, & Ruiz Rodríguez, 2009, pág. 54).

Esta máquina permite determinar la resistencia de un material a la abrasión que se produce ante un disco envuelto por caucho y el flujo de arena obteniendo como resultado los datos de pérdida de volumen en  $\text{mm}^3$  del material.

### 2.3.1 CARACTERÍSTICAS DE LA MÁQUINA

La máquina de ensayos para desgaste abrasivo se puede utilizar para analizar distintos tipos de materiales, sin embargo, su estructura es la misma; está compuesta por una tolva que será la encargada de almacenar y proveer la arena de Ottawa a través de una boquilla, de un disco recubierto por un caucho con una dureza shore A-60 que está en contacto directo con la probeta, un brazo que empujará la probeta contra el disco, un motor de 1 hp que proporcionará el torque y la potencia al disco recubierto y la arena de Ottawa que actuará como abrasivo.

La boquilla que proveerá del material abrasivo debe estar lo más cerca posible al disco y la probeta con el fin de obtener un flujo laminar de la arena de Ottawa. La boquilla puede tener una longitud conveniente que permita la conexión de la tolva y de la arena utilizando tubos de plástico, acero o hierro desarrollando un flujo de 300 a 400 gramos/minuto (ASTM, 2010, pág. 2).

El tipo de abrasivo debe ser una arena de grano de cuarzo redondeada AFS 50/70 de ensayo con un contenido de humedad que no debe exceder el 0.5% en peso (ASTM, 2010, pág. 2).

Además, la arena debe cumplir con las especificaciones mostradas a continuación en la tabla 2.1, con esto se pretende que la arena fluya de forma aerodinámica entre el espécimen y la rueda de goma.

**Tabla 2.1.** Especificaciones del abrasivo utilizado en ensayos según norma ASTM G-65

Abrasivo utilizado en ensayos según norma ASTM G-65		
Tamiz (U.S Size)	Tamaño de la abertura del tamiz $\mu\text{m}$ (in)	% de retenido en el tamiz
40	425 (0.0165)	No
50	300 (0.0117)	5 máx.
70	212 (0.0083)	95 min.
100	150 (0.0059)	No pasa

**Fuente:** (ASTM, 2010, pág. 2)

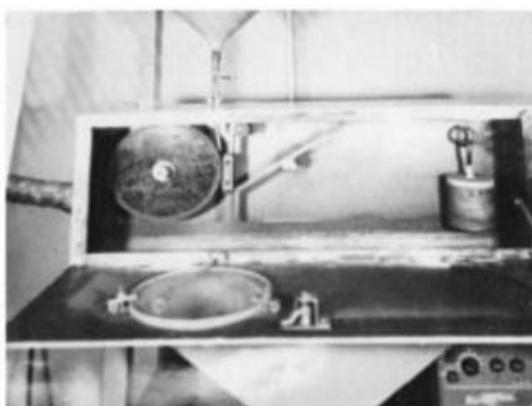
El disco es de acero recubierto por un anillo de caucho con una dureza Shore A-60 y es accionado por un motor D.C. con una potencia nominal de 1 HP (ASTM, 2010, pág. 2). El caucho será de clorobutilo y se adherirá curándose completamente en el molde de acero formando un solo conjunto.

La probeta debe ser de forma rectangular con dimensiones de 25 x 76 mm y un espesor de 3.2 a 12.7 mm (ASTM, 2010, pág. 6). La probeta debe estar libre de irregularidades en su superficie que puedan intervenir o afectar el ensayo obteniéndose resultados erróneos.

La rueda es accionada por un motor D.C. nominal de 0.7 kW (1 HP) a través de una caja de engranajes de 10:1 para asegurar que se entregue el torque completo durante la prueba; la

velocidad de giro ( $200 \pm 10$  rpm) debe permanecer constante bajo carga. Otros accionamientos que producen 200 rpm bajo carga son adecuados (ASTM, 2010, pág. 4).

La máquina deberá estar equipada con un contador de revoluciones que monitoreará el número de revoluciones de la rueda como se especifica en el procedimiento y se recomienda que el contador incremental tenga la capacidad de apagar la máquina después de alcanzar un número preseleccionado de revoluciones de la rueda o incrementos de hasta 12 000 revoluciones (ASTM, 2010, pág. 4).



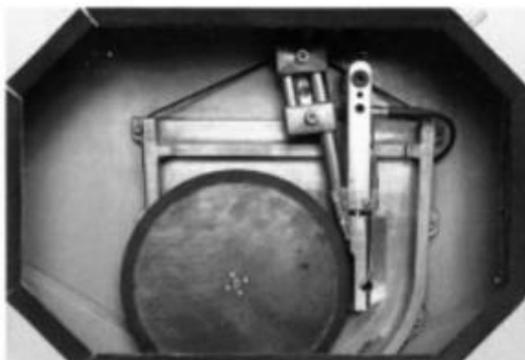
**Figura 2.13.** rueda y brazo de palanca  
(ASTM, 2010, pág. 3)

Como se muestra en la figura 2.13 la porta probetas se une al brazo de palanca al que se agregan los pesos de modo que se aplique una fuerza de 130N o 45N como se detalla en la tabla 2.2 a lo largo de la línea diametral horizontal de la rueda. Además, debe haber disponible una cantidad apropiada de pesos para aplicar la fuerza entre la muestra de prueba y la rueda (ASTM, 2010, pág. 2).



**Figura 2.14.** Balanza analítica  
(Imlab S.A.S, 2017)

La balanza utilizada para medir la pérdida de masa de la muestra de ensayo tendrá una sensibilidad de 0,001 gramos como se muestra en la figura 2.14; el procedimiento C requiere una sensibilidad de 0.0001 gramos (ASTM, 2010, pág. 5).



**Figura 2.15.** caja de la máquina  
(ASTM, 2010, pág. 4)

El tamaño y la forma de los elementos de soporte de la carcasa y la tolva pueden variar según las necesidades del usuario como se puede observar en la figura 2.15.

### 2.3.2 PARÁMETROS DE ENSAYO

La norma ASTM consta de cinco procedimientos que regulan los materiales según su resistencia a la abrasión teniendo en cuenta los parámetros detallados en la tabla 2.2.

**Tabla 2.2** Parámetros de ensayo según norma ASTM G-65

Parámetros de ensayo según norma ASTM G-65					
Procedimiento Especifico	Fuerza Aplicada a la Probeta		Revoluciones de la Rueda	Abrasión Lineal	
	N	Lb		m	ft
A	130	30	6000	4309	14138
B	130	30	2000	1436	4711
C	130	30	100	71.8	236
D	45	10.1	6000	4309	14138
E	130	30	1000	718	2360

Fuente: (ASTM, 2010, pág. 8)

### **2.3.2.1 Procedimiento A**

Esta es una prueba relativamente severa que clasificará los materiales metálicos en una escala amplia de pérdida de volúmenes desde baja a extrema resistencia a la abrasión y es particularmente útil en materiales de clasificación de resistencia a la abrasión media a extrema (ASTM, 2010, pág. 1).

### **2.3.2.2 Procedimiento B**

Este procedimiento es una variación del procedimiento A, sin embargo, se puede usar para materiales altamente resistentes a la abrasión, pero es particularmente útil para la clasificación de materiales de resistencia media y baja a la abrasión y se debe utilizar cuando los valores de pérdida de volumen desarrollados por el procedimiento A superan los 100 mm<sup>3</sup> (ASTM, 2010, pág. 1).

### **2.3.2.4 Procedimiento C**

Es una variación a corto plazo del procedimiento A para uso de recubrimientos finos (ASTM, 2010, pág. 1).

En la definición de recubrimientos finos ingresan materiales cromados o con un recubrimiento de algún otro material para aumentar su resistencia a la abrasión como por ejemplo recubrimientos de acero.

### **2.3.2.5 Procedimiento D**

Este es una variación de carga más ligera del procedimiento A, que es particularmente útil para clasificar materiales de baja resistencia a la abrasión y también se usa en materiales de clasificación de tipo genérico específico o materiales que serían muy cercanos en las tasas de pérdida de volumen desarrolladas por el procedimiento A (ASTM, 2010, pág. 1).

### **2.3.2.6 Procedimiento E**

Es una variación a corto plazo del procedimiento B que es útil en la clasificación de materiales con mediana o baja resistencia a la abrasión (ASTM, 2010, pág. 1).

## CAPÍTULO III

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 ELEMENTOS MECÁNICOS

##### 3.1.1 BRAZO Y PORTA PROBETA

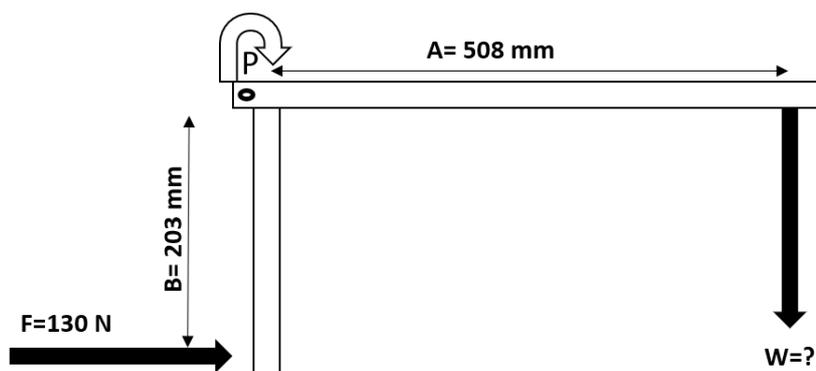
Según la norma ASTM G-65 el brazo y la porta probeta forman un mismo conjunto, por cuanto en la tabla 3.1 se detalla los parámetros a usarse en los mismos.

**Tabla 3.1** Parámetros de ensayo según norma ASTM G-65

Parámetros de ensayo según norma ASTM G-65					
Procedimiento Específico	Fuerza Aplicada a la Probeta		Revoluciones de la Rueda	Abrasión Lineal	
	N	Lb		m	ft
A	130	30	6000	4309	14138
B	130	30	2000	1436	4711
C	130	30	100	71.8	236
D	45	10.1	6000	4309	14138
E	130	30	1000	718	2360

Fuente: (ASTM, 2010, pág. 8)

##### 3.1.1.1 Diagrama de cuerpo libre del brazo de palanca



**Figura 3.1** Diagrama de cuerpo libre brazo de palanca

Con la finalidad de encontrar el peso que se debe aplicar al brazo de palanca se realizó un diagrama de cuerpo libre (DCL) que se aprecia en la figura 3.1.

Una vez realizado el diagrama de cuerpo libre se procedió a realizar la sumatoria de momentos en el punto P con la finalidad de calcular el peso y la masa que se debe aplicar al brazo de palanca para obtener una fuerza resultante de 130 N entre la probeta y el disco con la finalidad de realizar correctamente los ensayos.

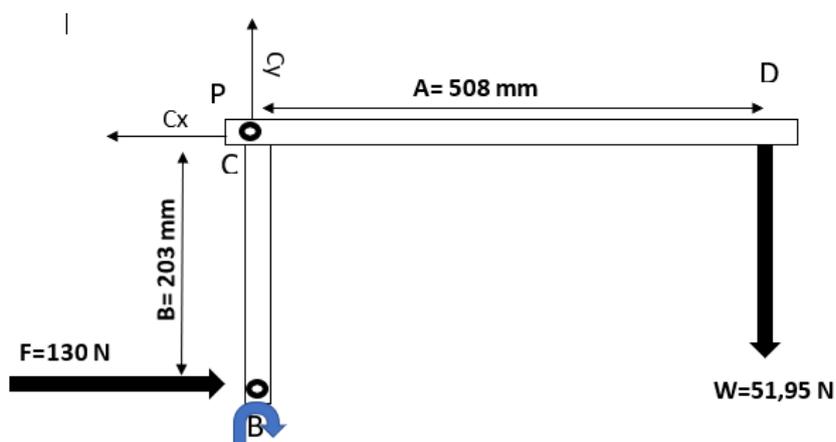
### 3.1.1.2 Cálculos

Aplicando la fórmula de sumatoria de momentos en el punto P se procedió a calcular el peso de la pesa a usarse:

$$\begin{aligned} \sum M_P &= 0 && [3.1] \\ (W \times A) - (F \times B) &= 0 \\ (W \times 0,508 \text{ m}) - (130 \text{ N} \times 0,203 \text{ m}) &= 0 \\ (W \times 0,508 \text{ m}) &= (130 \text{ N} \times 0,203 \text{ m}) \\ W &= \frac{(130 \text{ N} \times 0,203 \text{ m})}{0,508 \text{ m}} \\ W &= \frac{(26,39 \text{ Nm})}{0,508 \text{ m}} \\ W &= 51,95 \text{ N} \end{aligned}$$

Una vez calculado el peso se procedió a calcular la masa de la pesa:

$$\begin{aligned} W &= m \times g && [3.2] \\ m &= \frac{51,95 \text{ Kg} \frac{m}{s^2}}{9,81 \frac{m}{s^2}} \\ m &= 5,30 \text{ kg} \end{aligned}$$



**Figura 3.2** Diagrama de cuerpo libre de esfuerzos cortantes en el pasador del pivote.

Con la finalidad de encontrar la carga que se ejerce sobre perno que soporta el pivote del brazo se realizó un diagrama de cuerpo libre que se detalla en la figura 3.2 para luego calcular aplicando la ecuación 3.1 con respecto al punto B.

$$\begin{aligned}\Sigma M_B &= 0 \\ -C_X \times 203 \text{ mm} - C_Y \times 0 \text{ mm} + W \times 508 \text{ mm} &= 0\end{aligned}$$

Como en la ecuación anterior se tiene 2 incógnitas se procedió a calcular la sumatoria de fuerzas en el eje Y.

$$\begin{aligned}\Sigma F_Y &= 0 \\ -C_Y + W &= 0 \\ C_Y &= 51,95 \text{ N}\end{aligned}$$

Luego, para calcular  $C_X$  se reemplazó datos obteniendo:

$$\begin{aligned}-C_X \times 203 \text{ mm} - 51,95 \times 203 \text{ mm} + 51,95 \times 508 \text{ mm} &= 0 \\ -C_X &= -\frac{15484.75 \text{ Nmm}}{203 \text{ mm}} \\ C_X &= 78,05 \text{ N}\end{aligned}$$

Finalmente, se aplicó el teorema de Pitágoras detallado en la ecuación 3.3

$$C = \sqrt{C_X^2 + C_Y^2} \quad [3.3]$$

Donde:

C= Carga ejercida sobre el perno

Cx= Carga ejercida sobre el perno proyectada al eje de las X

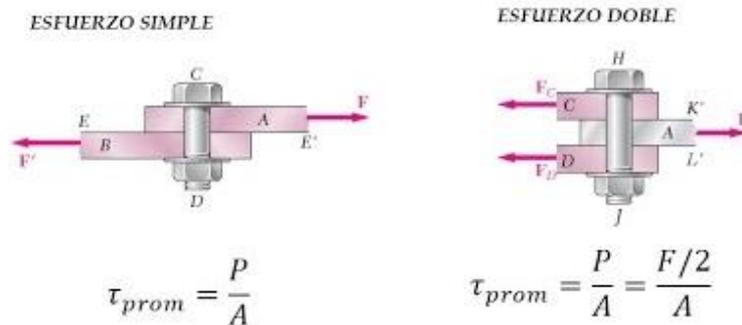
Cy= Carga ejercida sobre el perno proyectada al eje de las Y

Reemplazando datos se obtuvo:

$$C = \sqrt{78,05^2 + 51,95^2}$$

$$C = 93,76 \text{ N}$$

## ESFUERZO DE CORTE



**Figura 3.3** Esfuerzos cortantes de un perno  
(Aguirre, 2015, pág. 114)

Como se muestra en la figura 3.3 se tiene dos tipos de esfuerzos cortantes, sin embargo, en este caso se trabaja con un esfuerzo doble para el cálculo del esfuerzo cortante en el perno que soporta el pivote del brazo de palanca.

$$\tau = \frac{P}{A} \quad [3.4]$$

Donde:

$\tau$ = Esfuerzo cortante ejercido sobre el perno

P= Carga ejercida sobre el perno

A= Área del perno

$$\tau = \frac{F}{\frac{\pi D^2}{4}}$$

Donde:

$\tau$ = Esfuerzo cortante ejercido sobre el perno

F= Carga ejercida sobre el perno

D= Diámetro del perno

Para soportar el esfuerzo del pivote que generara el brazo de palanca, se utiliza un perno M12 y al sustituir datos se obtuvo:

$$\tau = \frac{93,76 N}{\frac{\pi 12^2 mm^2}{4}}$$

$$\tau = 0,41 MPa$$

CLASES DE RESISTENCIA Y MARCAS SODIPER	ESPECIFICACIÓN	MATERIAL	DIÁMETRO NOMINAL DEL PERNO	CARGA DE PRUEBA	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	CARGA DE PRUEBA	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	DUREZAS	
				PSI	KG/mm <sup>2</sup>	MIN	MÁX		
 CLASE DE RESISTENCIA 5.8	ISO 898 PARTE 1	ACERO DE BAJO O MEDIANO CARBONO	DESDE M6 HASTA M38	54.000	71.000	38	50	B82	B99.5
 CLASE DE RESISTENCIA 8.8	ISO 898 PARTE 1	ACERO DE MEDIO CARBONO TEMPLADO Y REVENIDO	M6 HASTA M16	71.000	114.000	58	80	C22	C32
			SOBRE M16 HASTA M38	85.000	114.000	60	80	C23	C39
 CLASE DE RESISTENCIA 10.9	ISO 898 PARTE 1	ACERO ALEADO TEMPLADO Y REVENIDO	DESDE M6 HASTA M38	118.000	143.000	83	100	C32	C39
 CLASE DE RESISTENCIA 12.9	ISO 898 PARTE 1	ACERO ALEADO TEMPLADO Y REVENIDO	DESDE M6 HASTA M38	138.000	171.000	97	120	C39	C44

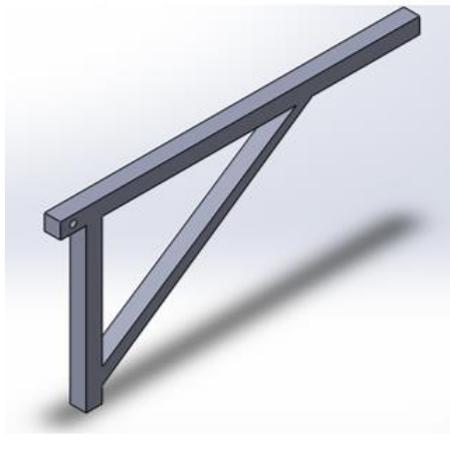
PSI : LIBRAS/PULGADAS CUADRADA  
KG/mm<sup>2</sup> : KILOS POR MILÍMETRO CUADRADO

**Figura 3.4** Especificaciones de resistencia de pernos acerados en milímetros (Sodiper, 2018)

Finalmente, se procedió a escoger el grado de acero que se necesitará según los datos del grafico 3.4 encontrando que el mas adecuado es un perno de grado 5.8 porque soporta hasta 50 Kg/mm<sup>2</sup> que son 490,33 MPa los cuales son adecuados para los 0,41 MPa encontrados.

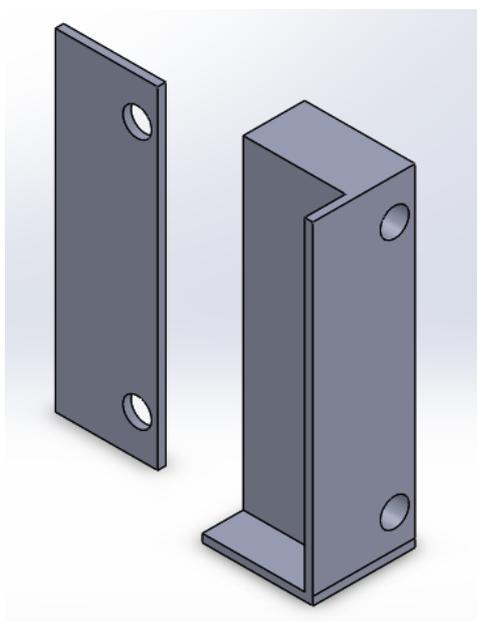


### 3.1.1.4 Diseño



**Figura 3.6** Vista 3D del brazo de palanca

Para finalizar el diseño del brazo de palanca se utilizó el software de SolidWorks 2018 que permite observar diseños en 3D como lo indica la figura 3.6.



**Figura 3.7** Vista 3D de la porta probetas

De la misma forma tras extraer su vista en 3D la figura 3.7 permite observar un detalle del diseño de la porta probetas. Sus dimensiones se los puede apreciar en el anexo VIII del documento.

### 3.1.2 SISTEMA DE LLENADO

El sistema de llenado consta de 2 elementos que son la tolva y la boquilla.

#### 3.1.2.1 Tolva

La tolva es el elemento que almacena el material abrasivo durante la realización de los ensayos. A continuación, se indican los parámetros utilizados en el diseño de la tolva:

Tiempo: El tiempo máximo que establece la normativa ASTM G-65 es de 30 minutos por lo que la tolva debe ser diseñada para un volumen que abastezca un flujo de arena continuo durante este tiempo.

Flujo de la arena: El flujo va desde 300 a 400 gr/min.

Densidad: Su densidad 0,64 gramos por centímetro cúbico

Para conocer la cantidad de arena que se va a necesitar en los ensayos de la norma ASTM G-65 se realizó los siguientes cálculos:

Tomando en cuenta la fórmula de flujo másico:

$$\dot{m} = \frac{m}{t} \quad [3.5]$$

Donde:

$\dot{m}$ = Flujo másico

m= masa

t= tiempo

Se procedió a despejar m con la finalidad de obtener la masa que se necesita.

$$m = \dot{m} * t$$

$$m = \frac{400\text{gr}}{\text{min}} * 30\text{min}$$

$$m = 12000\text{gr} = 12 \text{ kg}$$

Entonces la cantidad máxima de arena que se ocupa es de 12 kg.

A continuación, se procedió a realizar el cálculo del volumen que se necesitará usando la fórmula de la densidad:

$$\rho = m/v \quad [3.6]$$

Donde:

P= Densidad

m= masa

v= Volumen

$$V = m/\rho$$

$$V = \frac{12000\text{gr}}{0.64\text{gr/cm}^3}$$

$$V = 18750\text{cm}^3 = 18.75 \text{ L}$$

El volumen requerido es de 18.75 L; sin embargo, será diseñado para la capacidad de 20 L.

El diseño de la tolva se realiza en dos partes que son un tronco de cono y un cilindro que se unirán por medio de soldadura; el material a utilizar es acero galvanizado con un espesor de 1.5 mm. A continuación, se especifican las características geométricas de la tolva:

Elemento 1: tronco de cono (parte inferior de la tolva)

Datos:

$$R1= 8.5 \text{ mm} = 0.85 \text{ cm}$$

$$R2= 125 \text{ mm} = 12.5 \text{ cm}$$

$$h= 150 \text{ mm} = 15 \text{ cm}$$

Cálculo del volumen del elemento 1

$$V1 = \frac{h * \pi}{3} (R1^2 + R2^2 + R1R2) \quad [3.7]$$

Donde:

V= Volumen del elemento

h= altura del cono

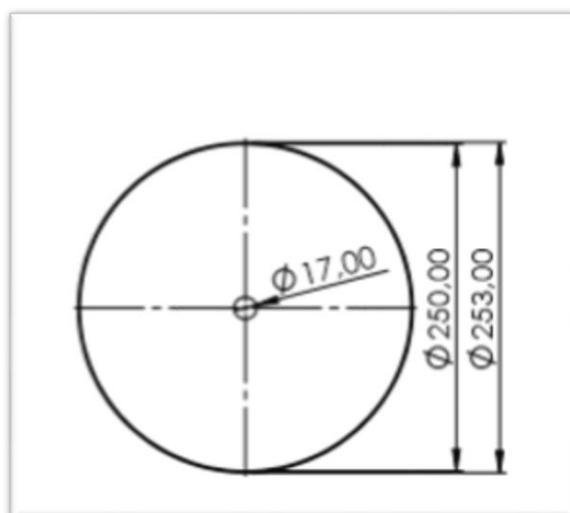
R1= Radio menor del cono

R2= Radio mayor del cono

$$V1 = \frac{15 * \pi}{3} (0.85^2 + 12.5^2 + 0.85 * 12.5)$$

$$V1 = 2632.6 \text{ cm}^3$$

$$V1 = 2.63 \text{ L}$$



**Figura 3.8** Dimensiones del tronco de cono de la tolva

La figura 3.8 muestra los planos finales del cono de la tolva que soportará 2.63 L de arena de otawwa.

Elemento 2: cilindro (parte superior de la tolva)

El volumen faltante es 17.37 L, por lo que se necesitó calcular la altura necesaria para poder obtener este volumen.

Datos:

$$R = 12.5 \text{ cm} = 125 \text{ mm}$$

$$V_2 = \pi R^2 h \quad [3.8]$$

Donde:

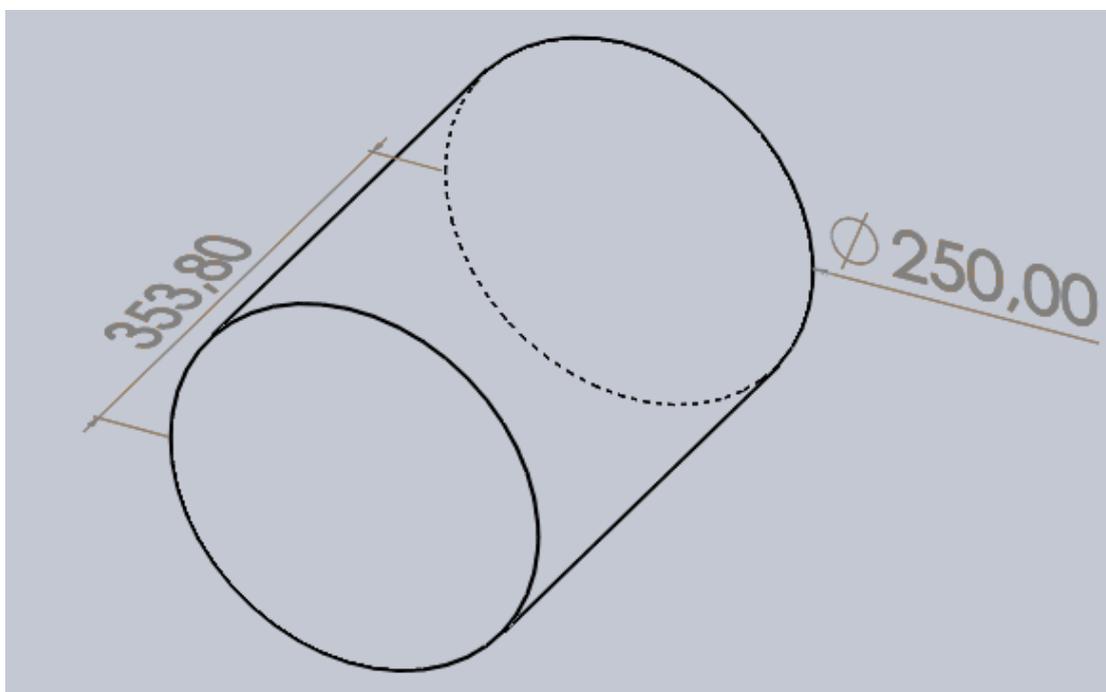
V= volumen del elemento

R= radio del cilindro

h= altura del cilindro

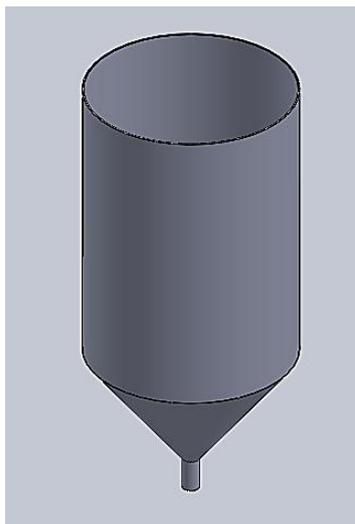
$$17370 = \pi(12.5^2)h$$

$$h = 35.38 \text{ cm} = 353.8 \text{ mm}$$



**Figura 3.9** Dimensiones del cilindro de la tolva

La figura 3.9 muestra los planos finales del cilindro de la tolva que soportara los 17,37 L de arena de otawwa restantes.



**Figura 3.10** Tolva diseñada en SolidWorks

Ya realizados ambos elementos necesarios para la tolva se procedió a realizar la unión de estos mediante suelda y se añade en la parte inferior del elemento un pequeño tubo del mismo diámetro que servirá para acoplar el sistema de distribución de la arena como se muestra en la figura 3.10.

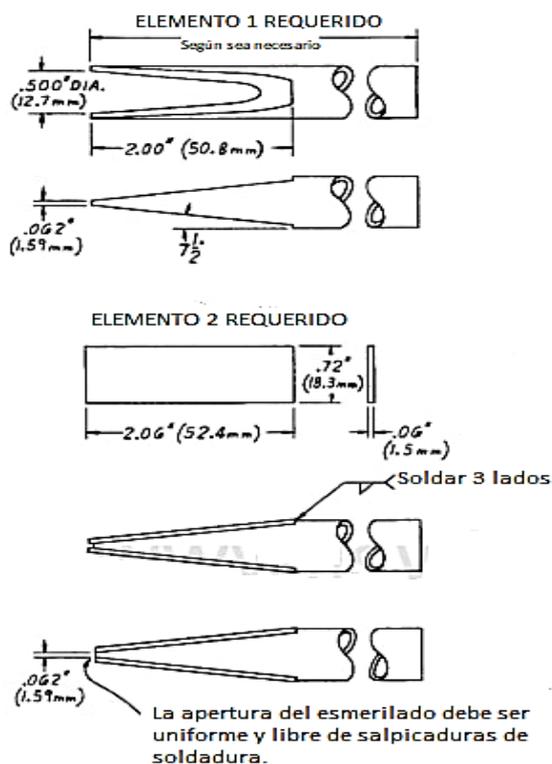
### **3.1.2.2 Boquilla**

La boquilla tiene como propósito principal distribuir la arena con un flujo laminar y preciso durante los ensayos y debe estar colocada lo más próxima a la probeta y el disco recubierto con caucho.

El diseño y las dimensiones de este elemento fueron realizados siguiendo la normativa ASTM G-65 por lo que posee una forma puntiaguda para así poder distribuir la arena en el sitio específico.

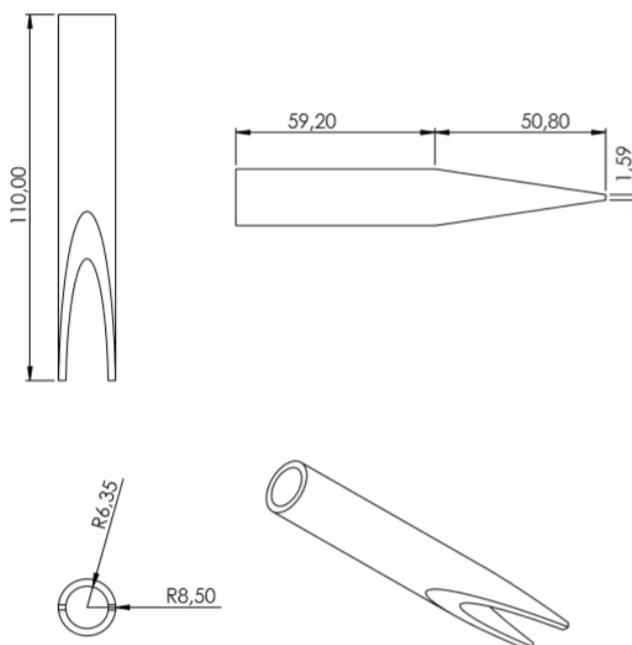
La boquilla está diseñada para proporcionar un flujo constante que comprende entre los 300 y 400 gramos/minuto.

Finalmente, para su construcción se prefirió el acero inoxidable debido a que es fácilmente soldable y posee buena resistencia a la corrosión, de la misma manera también se puede utilizar cobre y acero.



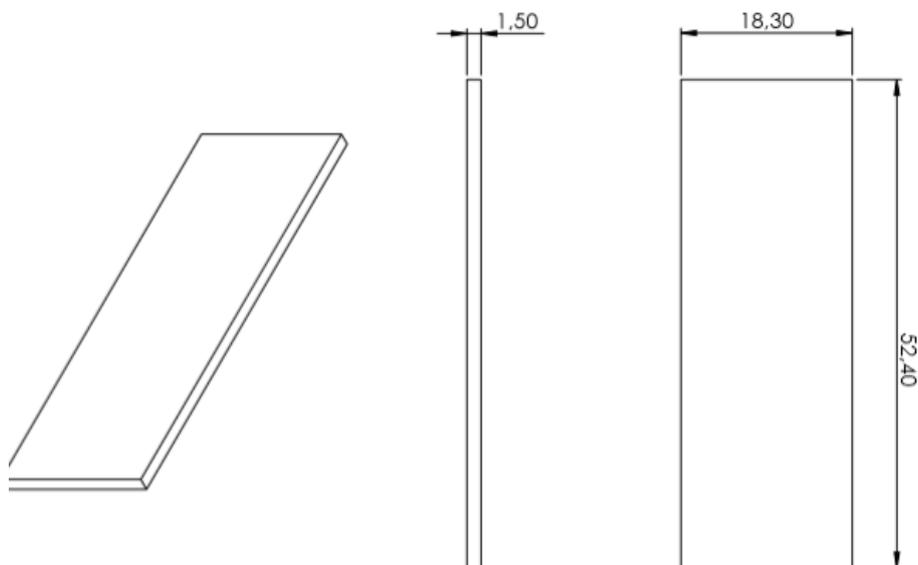
**Figura 3.11** Diseño de la boquilla de acuerdo a la norma ASTM G65 (ASTM, 2010, pág. 6)

Como se muestra en la figura 3.11 para la realización de la boquilla se la realiza en dos partes que se explican a continuación:



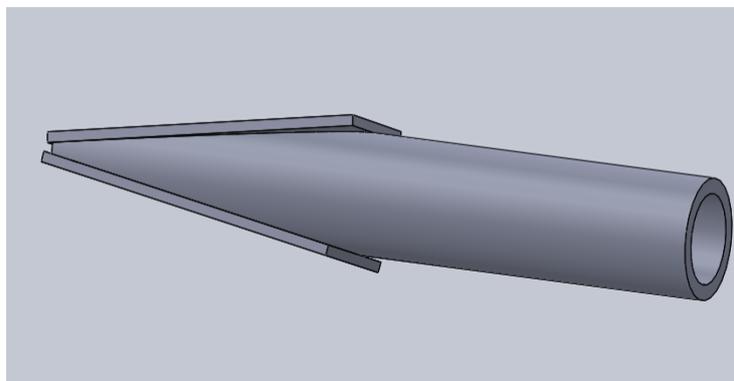
**Figura 3.12** Dimensiones para la fabricación del elemento 1 de la boquilla

Para el elemento 1 se utilizó un tubo redondo en el cual fue necesario la realización de dos cortes como se dispone en la figura 3.12.



**Figura 3.13** Dimensiones de la placa para la fabricación del elemento 2 de la boquilla

Elemento 2: Para la construcción de la boquilla se necesita dos platinas que serán utilizadas para cerrar la boquilla y permitirán el flujo establecido de arena y que se distribuya de manera uniforme; la platina será fabricada de acuerdo a las dimensiones que se indican en la figura 3.13.



**Figura 3.14** Boquilla diseñada en SolidWorks

Ya finalizados los elementos se procede a realizar la soldadura con la finalidad de obtener la boquilla como se indica en la figura 3.14 y anexo III

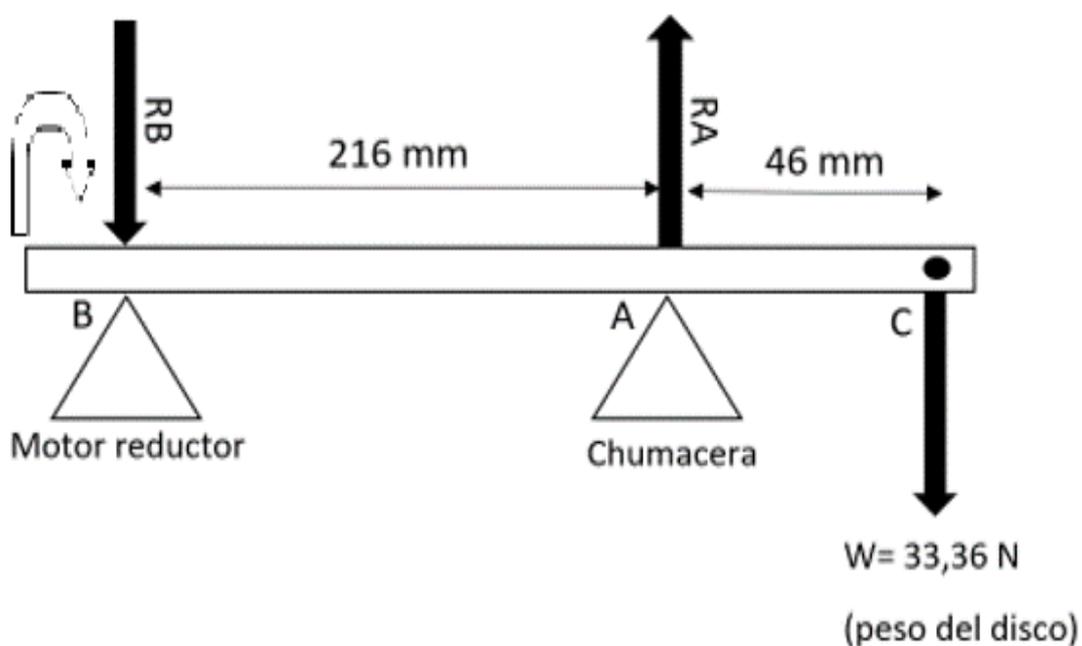
### 3.1.3 EJE DE TRANSMISIÓN

Para el diseño del eje de transmisión se utilizó acero de transmisión AISI 1018 que en Ecuador es el equivalente del acero AISI 1020 que indica la normativa ASTM G-65 además de ser el más comercial en el medio. Este tipo de acero dispone de las propiedades mecánicas mostradas en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2** Propiedades mecánicas del acero AISI 1018

$S_{ut}$	450 MPa
$S_y$	235 MPa
Dureza Brinell	200 BH
Reducción de área	40%

Fuente: (Molina Arce, 2010)



**Figura 3.15** Diagrama de fuerzas que actúan sobre el eje de transmisión

El eje se encuentra sometido a esfuerzos flexionantes y torsionales constantes, por tal razón se diseñó bajo el criterio de falla de fatiga donde es necesario realizar el análisis de las fuerzas que actúan sobre el eje con un diagrama tal como se muestra en la figura 3.15.

Con el diagrama de cuerpo libre se procedió a realizar el cálculo de las reacciones existentes en los apoyos del eje que en este caso serían el motor reductor y la chumacera.

Como primer paso se calculó RA tomando como punto de referencia (B) al motor reductor se reemplazó datos en la ecuación 3.1 para poder calcular RA.

$$\sum M_B = 0$$

$$0,262 \text{ m} \times W - 0,216 \text{ m} \times RA = 0$$

$$0,262 \text{ m} \times 33,36 \text{ N} = 0,216 \text{ m} \times RA$$

$$RA = \frac{8,740 \text{ Nm}}{0,216 \text{ m}}$$

$$RA = 40,46 \text{ N}$$

A continuación, se tomó como punto de referencia (A) a la chumacera se reemplazó datos en la ecuación 3.1 para poder calcular RB.

$$\sum M_A = 0$$

$$0,046 \text{ m} \times W - 0,216 \text{ m} \times RB = 0$$

$$0,046 \text{ m} \times 33,36 \text{ N} = 0,216 \text{ m} \times RB$$

$$RB = \frac{1,535 \text{ Nm}}{0,216 \text{ m}}$$

$$RB = 7,11 \text{ N}$$

Es importante también conocer el torque que va a estar presente durante la fricción de la probeta y el disco recubierto de caucho. Para esto es necesario calcular primeramente la fuerza de rozamiento entre el disco y la probeta por lo que se aplica la ecuación 3.9 teniendo como datos:

Fuerza aplicada al disco de caucho = 130 N

Coeficiente de rozamiento disco recubierto de caucho y probeta = 0,55 (Espinoza Ruiz, 2017, pág. 52).

$$F_{rC} = F_C \times C_{fr} \quad [3.9]$$

Donde:

$F_{rC}$  = Fuerza de rozamiento en el punto C (disco)

$F_C$  = Fuerza aplicada al disco de caucho

$C_{fr}$  = Coeficiente de fricción entre el disco recubierto de caucho y la probeta

$$F_{rC} = 130 \text{ N} \times 0,55$$

$$F_{rC} = 71,5 \text{ N}$$

Una vez calculada la fuerza de rozamiento se procedió a calcular el torque en el punto C (disco recubierto de caucho).

$$T_C = \frac{\emptyset \text{ Disco}}{1000} \times F_{rC} \quad [3.10]$$

Donde:

$T_C$  = Torque en el punto C (disco recubierto de caucho)

$\emptyset$  = Diámetro del disco recubierto de caucho

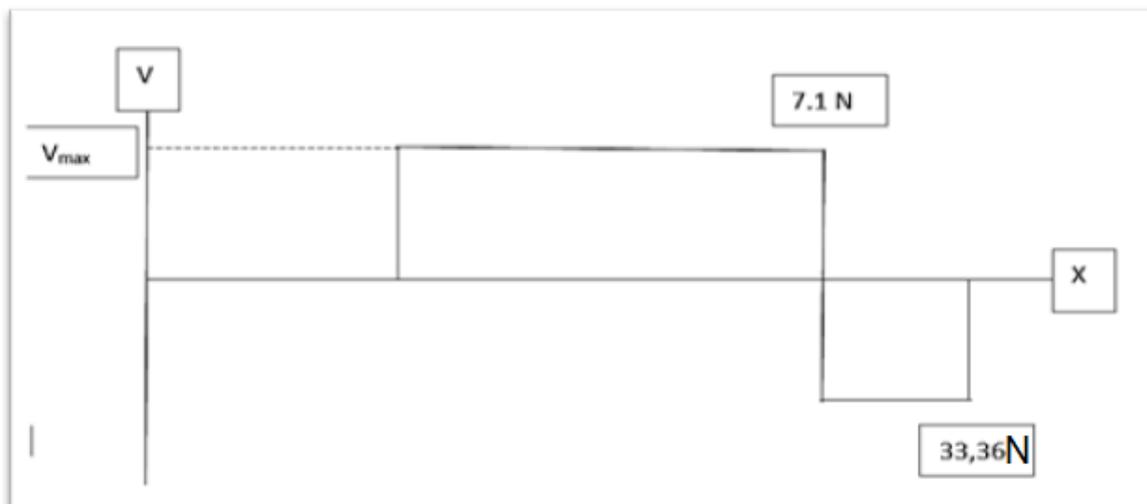
$F_{rC}$  = Fuerza de rozamiento en el punto C (disco recubierto de caucho)

$$T_C = \frac{229 \text{ mm}}{1000} \times 71,5 \text{ N}$$

$$T_C = 16,37 \text{ Nm}$$

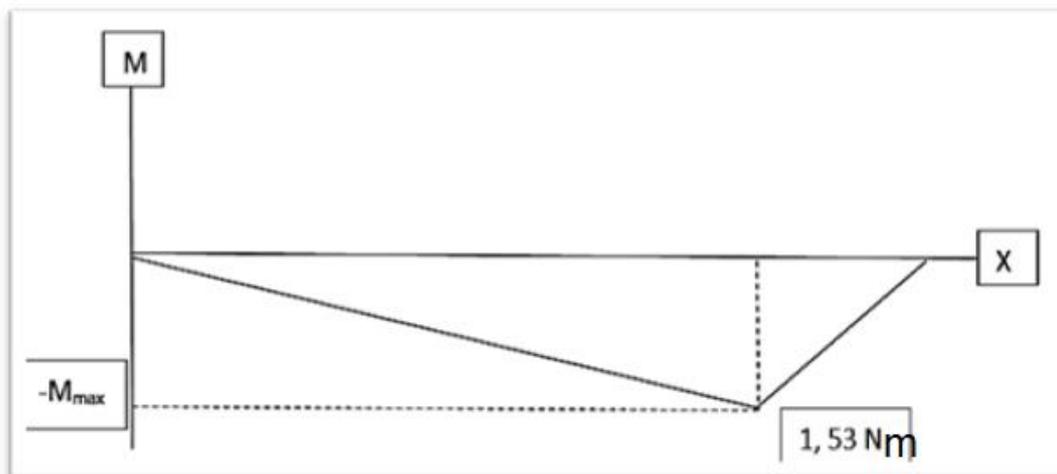
### 3.1.3.1 Cortante máximo y Momento flector máximo

Una vez calculadas las reacciones y completado los datos del diagrama de cuerpo libre se procedió a realizar los diagramas de fuerzas cortantes y momentos flectores con la finalidad de obtener sus valores.



**Figura 3.16** Diagrama de fuerza cortante máxima

Como se muestra en la figura 3.16 del diagrama de fuerza cortante se obtuvo que el valor del cortante máximo es 7,1 N.



**Figura 3.17** Diagrama del momento flector máximo

De la misma manera se procedió a realizar el diagrama de cuerpo libre del momento flector detallado en la figura 3.17.

Con el diagrama de fuerza cortante se obtuvo que el valor del cortante máximo es 1,53 N. Sin embargo, el momento flector también se lo pudo calcular con la ecuación 3.11

$$M_{\max} = F \times L \quad [3.11]$$

Donde:

$M_{\max}$  = Momento flector máximo.

F= Fuerza que soporta el sistema.

L= Longitud entre el apoyo y la fuerza.

Sustituyendo datos se obtuvo:

$$M_{\max} = 33,36 \text{ N} \times 0,046 \text{ m}$$

$$M_{\max} = 1,534 \text{ N m}$$

Una vez identificados las fuerzas y reacciones que actúan sobre el eje en cuestión se procedió a calcular su resistencia a la fatiga.

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S_e' \quad [3.12]$$

Donde:

$S_e$  = Resistencia a la fatiga, [MPa].

$k_a$  = Factor de modificación de la condición superficial.

$k_b$  = Factor de modificación del tamaño.

$k_c$  = Factor de modificación de la carga.

$k_d$  = Factor de modificación de la temperatura.

$k_e$  = Factor de modificación de efectos diversos.

$S_e'$  = Límite de resistencia a la fatiga, [MPa].

### 3.1.3.2 Factor de modificación de la condición superficial.

Para el cálculo del factor de modificación superficial es necesario conocer los coeficientes de los acabados superficiales a los cuales puede estar sometido el eje detallados en la tabla 3.3.

**Tabla 3.3** Coeficientes para el cálculo del factor de modificación de la condición superficial

Acabado superficial	a (MPa)	b
Esmerilado	1,58	-0,086
Maquinado o laminado en frio	4,45	-0,265
Laminado en caliente	56,1	-0,719
Como sale de forja	271	-0,995

**Fuente:** (Molina Arce, 2010)

En este caso como se trataba de un eje de transmision se escogió los datos de maquinado o laminado en frio para poder sustituirlos en la ecuacion:

$$k_a = aS_{ut}^b \quad [3.13]$$

Donde:  $S_{ut}$  = Límite de resistencia a la tensión

Tomando los datos de las tablas 3.2 y 3.3 y sustituyendo en la ecuación 3.13 se obtuvo lo siguiente:

$$k_a = 4,45 (450)^{-0,265}$$

$$k_a = 0,881$$

### 3.1.3.3 Factor de modificación de tamaño

El factor de modificación de tamaño está en conjunción con el diámetro del eje por lo que se tomó un supuesto que posteriormente se corregirá. En este caso se utiliza un diámetro de 3 cm; entonces:

$$k_b = \left(\frac{d}{7,62}\right)^{-0,1133} \quad ; 3\text{mm} \leq d \leq 50 \text{ mm} \quad [3.14]$$

$$k_b = 0,856$$

### 3.1.3.4 Factor de modificación de carga

En el diseño de ejes se tiene preestablecidos los factores de modificación de carga que están detallados en la tabla 3.4

**Tabla 3.4** Factores de modificación de carga para ejes

Valores de $K_c$	Tipo de carga
0,923	Carga axial, $S_{ut} \leq 1520$ MPa
1	Carga axial, $S_{ut} > 1520$
1	Flexión
0,577	Torsión

**Fuente:** (Molina Arce, 2010)

Los ejes están sometidos a flexión y su factor de modificación de carga será 1.

### 3.1.3.5 Factor de modificación de temperatura

El factor de modificación de temperatura depende de la temperatura a la que se encuentra sometida la máquina y en este trabajo de grado estará operativa a temperatura ambiente. Por esta razón el factor de modificación de temperatura será 1.

Para esto se dispone de datos predeterminados a diferentes temperaturas detallados a continuación en la tabla 3.5 donde se indica el factor que se debe usar en relación con la temperatura a la cual se esté trabajando.

**Tabla 3.5** Factores de modificación de temperatura a diferentes temperaturas

Temperatura °C	$K_d$
20	1
50	1,01
100	1,02
150	1,025
200	1,020
250	1,000
300	0,975
350	0,943
400	0,9
450	0,843
500	0,768
550	0,672
600	0,549

**Fuente:** (Molina Arce, 2010)

### 3.1.3.6 Factor de Modificación de efectos diversos

Como en el eje en cuestión no existen cambios de sección ni concentradores de esfuerzos, el factor de efectos diversos es igual a 1.

### 3.1.3.7 Límite de resistencia a la fatiga

Para el cálculo del límite de resistencia a la fatiga se tiene dos situaciones que son:

1. Si  $S_{ut} \leq 1400$  MPa se utiliza una constante de 0,5 para el calculo del límite de resistencia a la fatiga (Panadero, 2014, pág. 51).
2. Si  $S_{ut} > 1400$  MPa, el límite de resistencia a la fatiga es 700 MPa (Panadero, 2014, pág. 51).

En este caso se tiene un  $S_{ut}$  de 450 MPa como se muestra en la tabla 3.2 y por tal motivo el límite de resistencia a la fatiga esta determinado por la siguiente ecuación:

$$S'_e = 0,5S_{ut} \quad [3.15]$$

$$S'_e = 0,5(450)$$

$$S'_e = 225 \text{ MPa}$$

Una vez calculado todos estos factores se reemplazó datos en la ecuación 3.10 y se obtuvo:

$$S_e = (0,881)(0,856)(1)(1)(1)(225)$$

$$S_e = 169,680 \text{ MPa}$$

Posteriormente, se procedió al cálculo del diámetro del eje utilizando la ecuación:

$$d = \left( \left( \frac{32}{\pi} \right) \left( \frac{N}{S_e} \right) (\sqrt{M^2}) \right)^{\frac{1}{3}} \quad [3.16]$$

Donde:

$d$  = Diámetro del eje, [mm].

$N$  = Factor de seguridad estático del sistema, en este caso se utiliza de 2,5

$S_y$  = Resistencia a la fluencia

$M$  = Momento flector en la sección crítica del eje

$$d = \left( \left( \frac{32}{\pi} \right) \left( \frac{N}{S_e} \right) (\sqrt{M^2}) \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$d = \left( \left( \frac{32}{\pi} \right) \left( \frac{2,5}{169,68 \frac{N}{mm^2}} \right) (\sqrt{1534,56^2 N^2 mm^2}) \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$d = 6,13 \text{ mm}$$

Una vez calculado el diámetro del eje se volvió a calcular el factor de modificación de tamaño y el límite de resistencia a la fatiga utilizando las ecuaciones 3.12 y 3.10 obteniendo:

$$k_b = \left(\frac{d}{7,62}\right)^{-0,1133} \quad ; 3\text{mm} \leq d \leq 50 \text{ mm}$$

$$k_b = 0,96$$

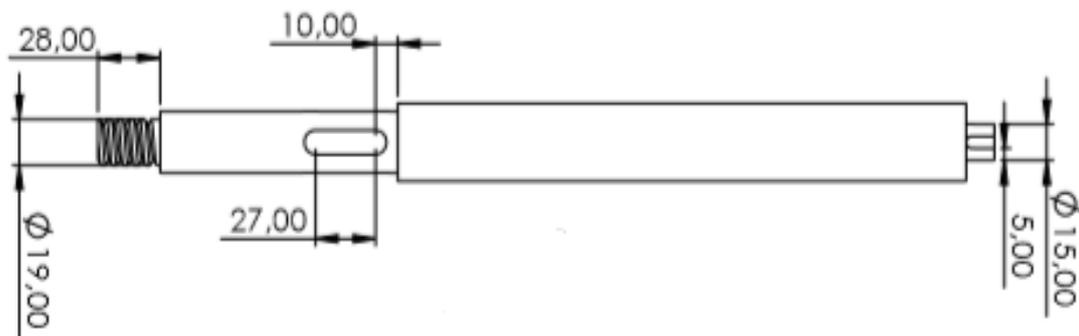
$$S_e = (0,881)(0,961)(1)(1)(1)(225)$$

$$S_e = 190,49 \text{ Mpa}$$

Con estos nuevos datos se volvió a calcular el diámetro reemplazando datos en la ecuación 3.14 obteniendo:

$$d = \left(\frac{32}{\pi}\right) \left(\frac{2,5}{190,49 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}\right) \left(\sqrt{1534,56^2 \text{ N}^2 \text{ mm}^2}\right)^{\frac{1}{3}}$$

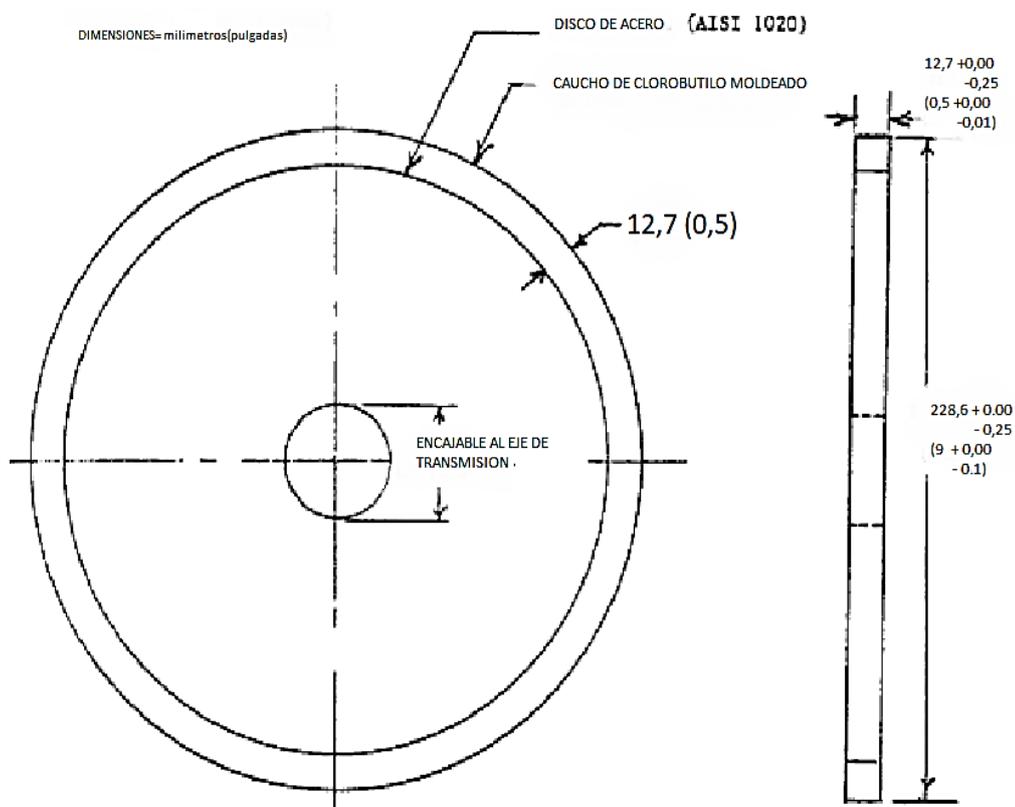
$$d = 5,90 \text{ mm}$$



**Figura 3.18** Vista frontal del eje de transmisión

Luego de la recopilación de los datos anteriores se tomó como diámetro mínimo los 15 mm y se dio forma a la estructura del eje como se muestra en la figura 3.18 y en los planos adjuntos como anexo VII.

### 3.1.4 DISCO



**Figura 3.19** Disco de acero recubierto por caucho de goma  
(ASTM, 2010)

Para el diseño del disco se consideró dos elementos: el disco y el recubrimiento del caucho el cual debe ser vulcanizado y poseer una dureza Shore A-60; las dimensiones y materiales del disco se toman directamente de la norma ASTM G-65 como se muestra en la figura 3.19, donde se tiene:

1. Diámetro del disco de acero de 8" (203,2 mm) y un espesor de 0,5" (12,7 mm).
2. Recubrimiento de caucho sintético de clorobutilo (CIIR) con dimensiones de 0,5" (12,7 mm) de ancho y espesor.

Para la fabricación del disco se utilizó acero AISI 1018 el cual en el mercado local sustituye al acero AISI 1020 que es el requerido en la normativa por su similitud tanto en su composición química como en sus propiedades mecánicas.

	1018	1020
Hierro, fe	98.81-99.26%	99.08-99.53
Carbono, c	0.18%	0.20%
Manganeso, Mn	0.6-0.9%	0.30-0.60%
Fósforo, p (max)	0.04%	0.04%
Azufre, S (max)	0.05%	0.05%

**Figura 3.20** Especificaciones químicas del acero AISI 1018  
**Fuente:** (CAPITAL STEEL AND WIRE, INC. , SF)

Como se puede observar en la figura 3.20 químicamente estos dos tipos de aceros son similares aparte de las concentraciones más altas de manganeso en el AISI 1018 por lo que se tomó la decisión de utilizar este tipo de material en su fabricación.

Laminado en caliente		
	1018	1020
Resistencia a la tracción	58,000 psi	55,000 psi
Fuerza de rendimiento	32,000 psi	30,000 psi
Alargamiento (2 ")	25%	25%
Reducción de Área	50%	50%
Dureza Brinell	116	111
Retirado en frio		
	1018	1020
Resistencia a la tracción	64,000 psi	61,000 psi
Fuerza de rendimiento	54,000 psi	51,000 psi
Alargamiento (2 ")	15%	15%
Reducción de Área	40%	40%
Dureza Brinell	126	121

**Figura 3.21** Propiedades mecánicas del acero AISI 1018 laminado en caliente  
**Fuente:** (CAPITAL STEEL AND WIRE, INC. , SF)

En lo referente a propiedades mecánicas tenemos laminados en caliente o retirados en frio como se detalla en la figura 3.21

Con respecto al caucho de clorobutilo (CIIR) su adquisición se tornó un problema debido a que este tipo de caucho es poco casual en el medio local y nacional y la cantidad requerida no fue significativa para poder importarlo por lo que los distribuidores y proveedores ubicados fuera del país sostenían no poder enviar el producto.

Sin embargo, luego de realizar una revisión a documentos relacionados con la fabricación de máquinas de ensayo según norma técnica ASTM G-65, se encontró que en la Universidad de Santo Tomás de Bogotá se optó por el uso del caucho de nitrilo (NBR 60) teniendo como sustento una consulta desarrollada a los ingenieros de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá y a los Ingenieros de la Universidad Nacional de Colombia de Medellín encargados de la fabricación de dispositivos de ensayo bajo norma ASTM G-65 de características similares a las de la máquina en cuestión, a los cuales se les había presentado el mismo inconveniente respecto a la adquisición del caucho CIIR.

El NBR 60 es un material accesible en el país y sus propiedades se acercan considerablemente a las del CIIR como lo podemos observar en la tabla 3.6.

**Tabla 3.6** Propiedades mecánicas de los cauchos CIIR y NBR 60

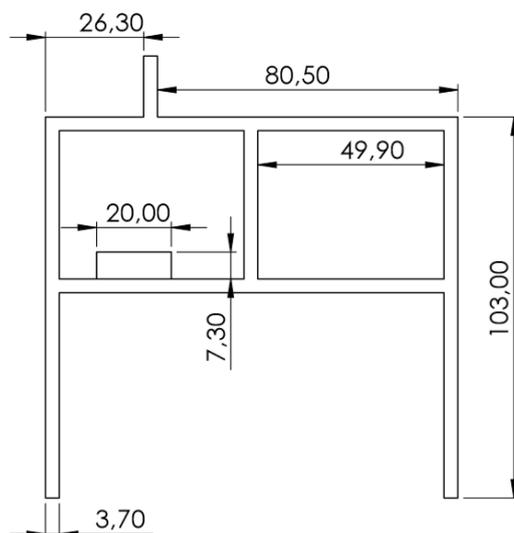
Nombre comercial	Componente activo	Dureza	Temperatura de servicio	Resistencia a la tracción	Alargamiento de rotura
		Shore A	°C	Mpa	%
CIIR	Clorobutilo	60	120	18	620
NBR 60	Acrilonitrilo Butadieno	60± 2	100	14	580

**Fuente:** (URIBE, 2018)

### 3.1.5 ESTRUCTURA

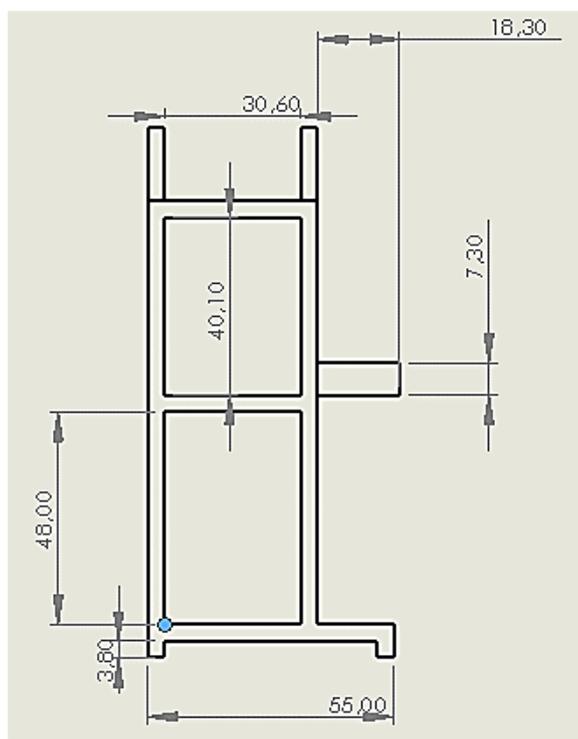
Para la estructura se utilizó tubo cuadrado de 38.1 mm x 38.1 mm x 1.5 mm que se consideró suficiente para poder soportar tanto las cargas como los elementos que conforman la máquina. De la misma manera este tipo de material es fácilmente soldable y tiene buenas

propiedades de resistencia lo cual es indispensable para mantener una estructura firme para su correcto funcionamiento.



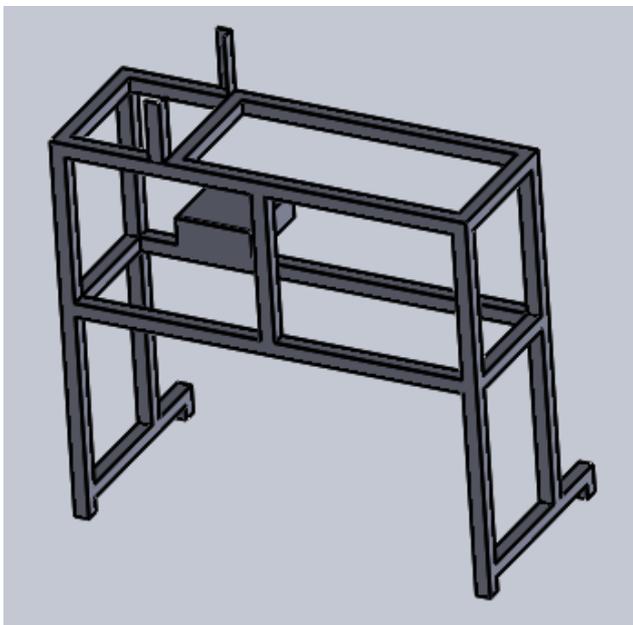
**Figura 3.22** Estructura de la máquina de desgaste abrasivo vista frontal

Una vez determinado el tamaño de todos los elementos de la máquina de ensayos como son: el brazo, el disco recubierto de caucho, la tolva y el motor reductor se procedió a dimensionar su estructura como se puede observar en la figura 3.22.



**Figura 3.23** Estructura de la máquina de desgaste abrasivo vista lateral

También se puede observar sus dimensiones analizando desde su vista lateral como indica la figura 3.23.



**Figura 3.24** Estructura de la máquina de desgaste abrasivo vista 3D

Finalmente, la vista 3D de la figura 3.24 nos permite observar de mejor manera el diseño de la estructura la cual dará forma a la máquina. También podemos observar los planos en el anexo V

## **3.2 ELEMENTOS ELÉCTRICOS**

### **3.2.1 MOTOR-REDUCTOR ELÉCTRICO**

Para accionar la rueda recubierta de goma se utilizó un motor eléctrico trifásico de marca WEG modelo W22 de 1 HP que se encuentra acoplado a una caja reductora de engranajes de 10 a 1, cuya reducción es recomendada por la norma (ASTM, 2010, pág. 4). Con este motor se garantizó la entrega total de torque durante la realización de las pruebas y con la ayuda del variador de frecuencia se mantuvo al disco girando a  $200 \pm 10$  rpm.

Cabe mencionar que no fue necesario el cálculo de selección del reductor debido a que la norma ASTM G-65 ya especifica la relación de engranajes que se debe utilizar.

El motor utilizado presenta las siguientes características:

#### MOTOR WEG G22

Número de fases: 3

Potencia nominal: 1 HP

Tensión nominal de operación: 220/380/440

Eficiencia: 77%

Frecuencia: 60 Hz

Corriente nominal de operación: 3.2/1.85/1.60 A

Factor de potencia: 0.8

Velocidad nominal del motor: 1730 rpm

Se incorporó una caja reductora de velocidad cuyos engranajes permiten disminuir las revoluciones por minuto del motor con una relación de 10 a 1 con la cual se obtuvo las 200 revoluciones necesarias para los ensayos.

### 3.2.2 VARIADOR DE FRECUENCIA

Para establecer la frecuencia a la que se realizó la programación del variador se calculó el número de polos que posee el motor trifásico aplicando la siguiente ecuación:

$$P = 120 * f/n \quad [3.17]$$

Donde:

P = número de polos

f = frecuencia en Hertz

n = velocidad del motor en rpm

$$P = \frac{120 * 60}{1730}$$

$$P = 4 \text{ polos}$$

Una vez encontrado el número de polos se procedió a calcular la frecuencia despejando  $f$  en la fórmula 3.15, obteniendo:

$$f = \frac{P \cdot n}{120}$$

Debido a que se utiliza la caja de reducción de 10 a 1 se calculó la frecuencia utilizando la velocidad del motor de 2000 revoluciones.

$$f = \frac{4 * 2000}{120}$$

$$f = 66.66$$

Una vez obtenida la frecuencia se procedió a realizar la programación del variador de frecuencia para esto seguimos los siguientes pasos:

1. Se presiona el botón PRG
2. Seleccionamos el comando F0.02
3. A continuación, se pulsa el botón ENTER
4. Posteriormente se procedió a regular la frecuencia mediante el potenciómetro en 66.66 para obtener las 200 revoluciones establecidas por la normativa ASTM G-65
5. Presionamos el botón RUN para empezar el funcionamiento del motor

### **3.3 ELEMENTOS DE PROGRAMACIÓN**

Para comprobar que el disco gire a las revoluciones establecidas por la norma ASTM G 65 fue necesario implementar un sistema contador de revoluciones para lo cual se utilizó un sensor de efecto hall que permitió medir las rpm a las cuales gira el disco recubierto de caucho. Al ser un sensor de efecto hall se colocó un imán en el extremo del disco con lo cual

se creará un campo magnético al momento de que este pase sobre el sensor creando así una tensión eléctrica.

Para la programación se utilizó Arduino UNO y un módulo display en el cual se puede observar las revoluciones que marca el sensor de efecto hall, la programación se encuentra detallada en el anexo X.

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 PRUEBAS DE LOS ELEMENTOS DE LA MÁQUINA

Una vez finalizada la construcción de la máquina se procedió a comprobar que esta cumpla con los requerimientos establecidos por la norma ASTM G-65 para poder obtener resultados reales al realizar las pruebas en las pastillas de freno.

##### 4.1.1 COMPROBACIÓN DE FLUJO DE ARENA

Para comprobar que el flujo de arena sea el indicado en la norma ASTM G-65 se siguió el procedimiento establecido por (Aguirre, 2015) para lo cual se abrió la válvula ubicada en la boquilla de la tolva, se pesó la cantidad de arena que arrojaba la boquilla durante el tiempo de 1 minuto y se comprobó si el flujo de arena era constante y laminar detallando los resultados en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1** Pruebas de comprobación del flujo de arena

Prueba	Tiempo (min)	Valor real (gr)	Valor nominal (gr)	Resultado
1	1	328	300-400	Correcto
2	1	334	300-400	Correcto
3	1	351	300-400	Correcto
4	1	319	300-400	Correcto

##### 4.1.2 COMPROBACIÓN DEL DISCO RECUBIERTO

El disco recubierto de caucho cumple con la dureza shore A-60 como lo se especifica en la tabla 3.6 acerca de las propiedades del caucho de nitrilo. A continuación, se realizó el dimensionamiento del disco obteniendo los resultados mostrados en la tabla 4.2.

**Tabla 4.2** Pruebas de dimensiones realizadas al disco recubierto

	Valor real (in)	Resultado
Disco	8	Correcto
Recubrimiento de caucho	0.5	Correcto

### 4.1.3 COMPROBACIÓN DE LAS RPM DEL MOTOR

Los resultados de esta prueba garantizan el correcto funcionamiento del sistema de transmisión de la máquina, se comprobó que el disco gire a 200 revoluciones por minuto con una tolerancia de  $\pm 10$ , se programó al variador de frecuencia en 66.66 Hertz y se observó en la pantalla LCD el número de revoluciones a la cual gira el disco obteniendo los resultados mostrados en la tabla 4.3. Estos procedimientos fueron realizados de acuerdo a (Aguirre, 2015).

**Tabla 4.3** Comprobación de las rpm del motor

Prueba	Tiempo (min)	Valor nominal (rpm)	Valor real (rpm)	Tolerancia	Resultado
1	1	200	200	$\pm 10$	Correcto
2	1	200	200	$\pm 10$	Correcto
3	1	200	199	$\pm 10$	Correcto
4	1	200	199	$\pm 10$	Correcto
5	1	200	201	$\pm 10$	Correcto
6	1	200	200	$\pm 10$	Correcto
7	1	200	198	$\pm 10$	Correcto
8	1	200	200	$\pm 10$	Correcto

## 4.2 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

La máquina de ensayos de desgaste abrasivo construida permite la realización de pruebas en diversos materiales, en este caso la prueba se realizó en pastillas de freno metálicas, de asbesto, carbón y cerámicas. La norma da como modelo típico de probeta una forma

rectangular de 1 pulgada de ancho, 3 pulgadas de largo y de 0.12 a 0.50 pulgadas de grosor. Sin embargo, estas medidas pueden variar con la condición de que la longitud como el ancho de la probeta deben de ser los suficientes para indicar el desgaste provocado al realizarse la prueba. En la tabla 4.4 se indican las medidas de cada tipo de material.

**Tabla 4.4** Dimensiones de las probetas

Pastilla	Largo	Ancho	Espesor
Metálica	7.5 cm	2.5 cm	0.9 cm
Asbesto	7.5 cm	2.5 cm	1.1 cm
Carbón	7.5 cm	2.5 cm	1.3 cm
Cerámica	7.5 cm	2.5 cm	0.8 cm

Como se puede evidenciar varía el espesor en cada probeta por lo cual también va a variar la masa y volumen de cada una de ellas. Sin embargo, esto no representó ningún inconveniente al momento de interpretar los resultados ya que se trabajó con la masa y volumen inicial y final de cada uno de los elementos a ensayar.

### **4.3 DETERMINACIÓN DEL PROCEDIMIENTO A UTILIZAR**

Para determinar el procedimiento a utilizar se analizó los materiales de los cuales están compuestas las pastillas de freno para establecer de manera cuantitativa la resistencia al desgaste que posee cada material que las conforma y se designó los siguientes rangos de acuerdo a la tabla 4.5.

**Tabla 4.5** Rango de resistencia

RANGO	RESISTENCIA
1 – 3	Baja
4- 6	Media
7- 8	Alta
9- 10	Extrema

Se desglosó los principales componentes que conforman las pastillas de freno y se les dio una valoración tomando en cuenta su porcentaje y la resistencia abrasiva considerada como se indica en la tabla 4.6.

**Tabla 4.6** Valoraciones de los componentes de las pastillas de freno

COMPONENTE	PORCENTAJE %	PONDERACIÓN RESISTENCIA ABRASIVA CONSIDERADA	VALORACIÓN SEGÚN PORCENTAJE
Lubricantes (grafito, antracitas, sulfuros)	20	10	2.0
Ligantes orgánicos (resinas fenólicas, ceras y aceites)	20	3	0.6
Metales (Latón, bronce, cobre)	15	8	1.2
Fibras (fibra de vidrio, lana de roca, fibras de aramida)	10	7	0.7
Abrasivos	8	9	0.72
Cargas minerales (Barita, mica, talco, magnesita)	27	9	2.43
VALORACIÓN TOTAL			7.65

**Fuente:** (Espinoza Ruiz, 2017, pág. 50)

Una vez considerada la resistencia a la abrasión se realizó el análisis tomando en cuenta los procesos que nos dicta la norma ASTM G-65 como se muestra en la tabla 4.7.

**Tabla 4.7** Análisis del procedimiento a utilizar

PROCESO	RESISTENCIA A LA ABRASIÓN	DESCRIPCIÓN	CARGA	TIEMPO
A	Extrema	Especialmente para metales	130 N	30 min
B	Alta/media/baja	Se usa cuando el procedimiento A supera los 100 mm <sup>3</sup> de desgaste	130N	10 min
C	Extrema	Se usa en recubrimientos finos	130 N	30 seg
D	Baja	Es una variación del procedimiento A	45 N	30 min
E	Media/baja	Es una variación del procedimiento B	130 N	5 min

**Fuente:** (ASTM, 2010, pág. 8)

Del análisis se pudo obtener que las pastillas de freno tienen una resistencia a la abrasión alta por lo cual se puede ubicar en el procedimiento B que dicta la norma ASTM G-65; posteriormente se analizó el proceso que se debe realizar en las probetas.

#### 4.4 PROCESO DE FUNCIONAMIENTO

Para poder realizar los ensayos se debe seguir el siguiente procedimiento:

1. Limpiar las probetas con solvente retirando cualquier suciedad o partícula extraña, posterior a esto se dejó secar la probeta para eliminar estos residuos.
2. Pesar cada una de las probetas utilizando una balanza analítica con una exactitud de 0.001 gr.



**Figura 4.1** Pesaje de las probetas

3. Con el brazo de la máquina levantado se procede a colocar la probeta; colocar el peso adecuado en el extremo del brazo para que se ejerza la presión entre la probeta y el disco y el brazo debe bajarse solo cuando haya iniciado el flujo de arena y empiece a girar el disco recubierto de caucho.
4. Programar el variador de frecuencia en los 66.66 Hertz y encender el motor reductor.
5. Esperar que el disco gire a las revoluciones deseadas comprobando el valor de 200 RPM en la pantalla LCD.
6. Abrir la llave que controla el paso de arena de Ottawa y observar que esta tenga un flujo constante y laminar.
7. Después de esto se bajará el brazo de la máquina con cuidado permitiendo de esta forma que la probeta entre en contacto con el disco y la arena abrasiva.
8. Una vez finalizada la prueba levantar el brazo de la máquina y retirar la probeta, detener el paso de arena y apagar el motor reductor.
9. Volver a pesar la probeta, y se observa el desgaste provocado por la arena abrasiva registrando los resultados obtenidos.

## 4.5 ENSAYOS A LAS PROBETAS

Mediante el pesaje de las probetas se obtuvo los siguientes resultados mostrados en la tabla 4.8.

**Tabla 4.8** Masa inicial de las pastillas de freno de asbesto

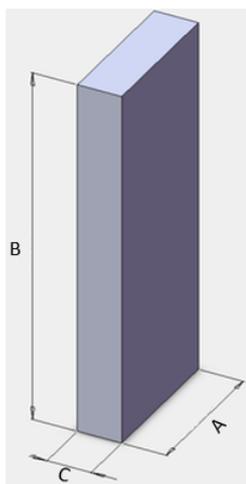
N° de probeta	ASBESTO Masa inicial (gr)	CARBÓN Masa inicial (gr)	METÁLICAS Masa inicial (gr)	CERÁMICA Masa inicial (gr)
1	41,9742	45,1164	53,9452	34,1218
2	41,5642	45,9772	53,2771	34,9742
3	41,7121	45,0175	53,4259	34,4977
4	41,5661	45,1874	53,3142	34,2490
5	41,5412	45,2591	53,2875	34,6745
6	41,9651	45,8743	53,5234	34,7527
7	41,6321	45,9125	53,3126	34,2316
8	41,8512	45,8821	53,7653	34,5284
9	41,6521	45,8215	53,1297	34,3915
10	41,9551	45,9135	53,6722	34,7541
11	41,5211	45,8215	53,7539	34,1895
12	41,6228	45,5514	53,9156	34,1352
13	41,7521	45,4258	53,3946	34,2845
14	41,8521	45,0195	53,6542	34,6216
15	41,8712	45,1266	53,2459	34,3751
16	41,9557	45,3658	53,8231	34,4328
17	41,7841	45,3875	53,7932	34,8569
18	41,9851	45,7152	53,6124	34,1572
19	41,8426	45,8125	53,1895	34,7982
20	41,7526	45,3569	53,2533	34,9130

Debido a la complejidad de saber la densidad de las diferentes pastillas de freno se optó por calcularla utilizando la siguiente formula:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [4.1]$$

La masa se obtuvo pesando la probeta antes de realizar el ensayo y el volumen se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$V = A * B * C \quad [4.2]$$



**Figura 4.2** Dimensionamiento de la probeta

La figura 4.2 indica el dimensionamiento a considerarse en el cálculo de su volumen donde A= ancho, B= largo y C=espesor.

Volumen de las pastillas de freno de asbesto:

$$V = 7.5 * 2.5 * 1.1$$

$$V = 20.625 \text{ cm}^3$$

Volumen de las pastillas de freno de carbón:

$$V = 7.5 * 2.5 * 1.3$$

$$V = 24.375 \text{ cm}^3$$

Volumen de las pastillas de freno metálicas:

$$V = 7.5 * 2.5 * 0.9$$

$$V = 16.875 \text{ cm}^3$$

Volumen de las pastillas de freno cerámicas:



**Figura 4.3** Pastilla de freno de cerámica no uniforme

El volumen de las pastillas de freno de cerámica se calculó de forma diferente a las demás debido a que presenta irregularidades en un extremo de la pastilla; esto fue porque no se pudo obtener pastillas más grandes en el mercado como se ve en la figura 4.3.



**Figura 4.4** Vaso de precipitación con un volumen de 225 ml de agua

La densidad se calculó utilizando un vaso de precipitación en el que se colocó agua a un volumen de 225 ml como se muestra en la figura 4.4.



**Figura 4.5** Pastilla de freno sumergida en el vaso de precipitación

Posteriormente se sumergió la pastilla de freno y se midió el volumen que marca el vaso de precipitación como se muestra en la figura 4.5.

Se realizó la diferencia de volúmenes obteniendo los siguientes resultados:

Volumen inicial = 225 cm<sup>3</sup>

Volumen final = 239 cm<sup>3</sup>

Diferencia de volúmenes = 14 cm<sup>3</sup>

Se procedió a calcular su densidad:

$$\rho = \frac{mf}{Vf} \quad [4.3]$$

$$\rho = \frac{27.6481 \text{ gr}}{14 \text{ cm}^3}$$

$$\rho = 1.9748 \text{ gr/cm}^3$$

Una vez obtenida la densidad de las pastillas de freno de cerámica se calculó el promedio de masa de cada material a ensayar, esto fue necesario para calcular con mayor exactitud la densidad de las pastillas de freno restantes como se indica a continuación:

Pastillas de freno de asbesto:

[4.4]

$$m = \frac{\sum \text{masas pastillas de asbesto}}{20}$$

$$m = 41.7676 \text{ gr}$$

Pastillas de freno de carbón:

$$m = \frac{\sum \text{masas pastillas de carbón}}{20}$$

$$m = 45.5272 \text{ gr}$$

Pastillas de freno cerámicas:

$$m = \frac{\sum \text{masas pastillas de cerámica}}{20}$$

$$m = 34,4970 \text{ gr}$$

Pastillas de freno metálicas:

$$m = \frac{\sum \text{masas pastillas metalicas}}{20}$$

$$m = 53.4154 \text{ gr}$$

La tabla 4.9 indica la masa promedio de las probetas a ensayar:

**Tabla 4.9** Masa promedio de las pastillas de freno

PASTILLA	MASA PROMEDIO (gr)
Asbesto	41.7676
Carbón	45.5272
Cerámica	34,4970
Metálica	53.4154

Una vez obtenida la masa promedio y el volumen de cada una se procedió a calcular la densidad de la siguiente forma:

Pastillas de freno de asbesto:

$$\rho = \frac{41.7676 \text{ gr}}{20.625 \text{ cm}^3}$$

$$\rho = 2.025 \text{ gr/cm}^3$$

Pastillas de freno de carbón:

$$\rho = \frac{45.5272 \text{ gr}}{24.375 \text{ cm}^3}$$

$$\rho = 1.867 \text{ gr/cm}^3$$

Pastillas de freno metálicas:

$$\rho = \frac{53.4154 \text{ gr}}{16.875 \text{ cm}^3}$$

$$\rho = 3.17 \text{ gr/cm}^3$$

Se obtuvo la densidad de cada tipo de pastillas de freno como se indica en la tabla 4.10

**Tabla 4.10** Masa, volumen y densidad de las pastillas de freno

PASTILLAS	MASA (gr)	VOLUMEN(cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD gr/cm <sup>3</sup>
Asbesto	41.7676	20.625	2.025
Carbón	45.5272	24.375	1.867
Cerámica	34.5312	17,529	1.97
Metálica	53.5494	16.875	3.17

Luego de haber concluido las pruebas en la máquina de ensayos de desgaste abrasivo se procedió a realizar el pesaje para comprobar el desgaste que sufrió cada una de las diferentes pastillas de frenos a analizar.

Las pastillas de freno de asbesto muestran una pérdida de masa que va de 3.2515 gr a 3.7569 gr como se indica en la tabla 4.11. Sin embargo, la pérdida de masa no demuestra el desgaste sufrido por estos materiales debido a la diferente densidad de cada uno por lo que fue necesario analizar estos resultados en pérdidas de volumen.

**Tabla 4.11** Cálculo de masa pérdida de las pastillas de asbesto

ASBESTO			
N. Probeta	Masa inicial (gr)	Masa final (gr)	Diferencia de masas (gr)
1	41,9742	38,5044	3,4698
2	41,5642	38,2791	3,2851
3	41,7121	37,9552	3,7569
4	41,5661	38,2097	3,3564
5	41,5412	38,2754	3,2658
6	41,9651	38,2527	3,7124
7	41,6321	38,0626	3,5695
8	41,8512	38,1638	3,6874
9	41,6521	39,2869	2,3652
10	41,9551	38,5426	3,4125
11	41,5211	37,8556	3,6655
12	41,6228	37,8749	3,7479
13	41,7521	38,1899	3,5622
14	41,8521	38,6006	3,2515
15	41,8712	38,1297	3,7415
16	41,9557	38,4622	3,4935
17	41,7841	38,1213	3,6628
18	41,9851	38,4437	3,5414
19	41,8426	38,5479	3,2947
20	41,7526	38,3672	3,3854



**Figura 4.6** Desgaste sufrido en la probeta de asbesto y carbón respectivamente.

La figura 4.6 muestra el desgaste producido en las pastillas de freno de asbesto y carbón. Las pastillas de freno de carbón muestran una pérdida de masa inferior a las pastillas de asbesto como se muestra en la tabla 4.12.

**Tabla 4.12** Cálculo de masa pérdida de las pastillas de carbón

CARBÓN			
N. Probeta	Masa inicial (gr)	Masa final (gr)	Diferencia de masas (gr)
1	45,1164	42,4042	2,7122
2	45,9772	43,5004	2,4768
3	45,0175	42,2039	2,8136
4	45,1874	42,6912	2,4962
5	45,2591	42,4696	2,7895
6	45,8743	43,0702	2,8041
7	45,9125	43,2574	2,6551
8	45,8821	43,3599	2,5222
9	45,8215	43,2230	2,5985
10	45,9135	43,3294	2,5841
11	45,8215	43,2093	2,6122
12	45,5514	42,8414	2,7100
13	45,4258	42,8273	2,5985
14	45,0195	42,5207	2,4988
15	45,1266	42,4112	2,7154
16	45,3658	42,6774	2,6884
17	45,3875	42,5731	2,8144
18	45,7152	43,1439	2,5713
19	45,8125	43,3443	2,4682
20	45,3569	42,8758	2,4811

Las pastillas de freno cerámica representan el mayor desgaste de pérdida de masa que las pastillas de freno de asbesto y de carbón con una pérdida de masa que va de 3,0819 gr a 3,9307 gr como se muestra en la tabla 4.13

**Tabla 4.13** Cálculo de masa pérdida de las pastillas de cerámica

CERÁMICA			
N. Probeta	Masa inicial (gr)	Masa final (gr)	Diferencia de masas (gr)
1	34,1218	30,3655	3,7563
2	34,9742	31,1246	3,8496
3	34,4977	30,6178	3,8799
4	34,2490	30,9512	3,2978
5	34,6745	30,7654	3,9091
6	34,7527	30,9982	3,7545
7	34,2316	31,1497	3,0819
8	34,5284	31,1846	3,3438
9	34,3915	30,9843	3,4072
10	34,7541	30,8654	3,8887
11	34,1895	30,7632	3,4263
12	34,1352	30,9023	3,2329
13	34,2845	30,9764	3,3081
14	34,6216	30,8852	3,7364
15	34,3751	30,6543	3,7208
16	34,4328	30,7992	3,6336
17	34,8569	31,0917	3,7652
18	34,1572	30,9610	3,1962
19	34,7982	30,9914	3,8068
20	34,9130	30,7345	3,9307



**Figura 4.7** Desgaste sufrido en la probeta de cerámica

La figura 4.7 nos muestra el desgaste de la pastilla de freno de cerámica.

Las pastillas de freno metálicas son las que tuvieron el menor desgaste respecto a las demás con pérdida de masa desde 1,9038 gr a 2.8219 gr como se indica en la tabla 4.14.

**Tabla 4.14** Cálculo de masa pérdida de las pastillas metálicas

METÁLICAS			
N. Probeta	Masa inicial (gr)	Masa final (gr)	Diferencia de masas (gr)
1	53,9452	51,7578	2,1874
2	53,2771	50,8490	2,4281
3	53,4259	51,0745	2,3514
4	53,3887	51,3465	2,0422
5	53,5692	51,1583	2,4109
6	53,7321	51,2411	2,4910
7	53,3095	50,6590	2,6505
8	53,8976	51,7084	2,1892
9	53,6549	51,3412	2,3137
10	53,7685	51,8548	1,9137
11	53,2996	50,9087	2,3909
12	53,3974	50,9875	2,4099
13	53,5768	51,1121	2,4647
14	53,8751	51,0532	2,8219
15	53,6750	51,1875	2,4875
16	53,4976	51,0799	2,4177
17	53,5848	51,6497	1,9351
18	53,7539	51,8501	1,9038
19	53,9032	51,4953	2,4079
20	53,7032	51,3128	2,3904



**Figura 4.8** Desgaste sufrido en la pastilla de freno metálica

La figura 4.8 muestra a la pastilla de freno metálica tras realizarse el ensayo

Para el reporte de resultados es necesario realizarlo en pérdidas de volumen para evitar confusiones causadas por la densidad por lo que se utilizó la fórmula a continuación:

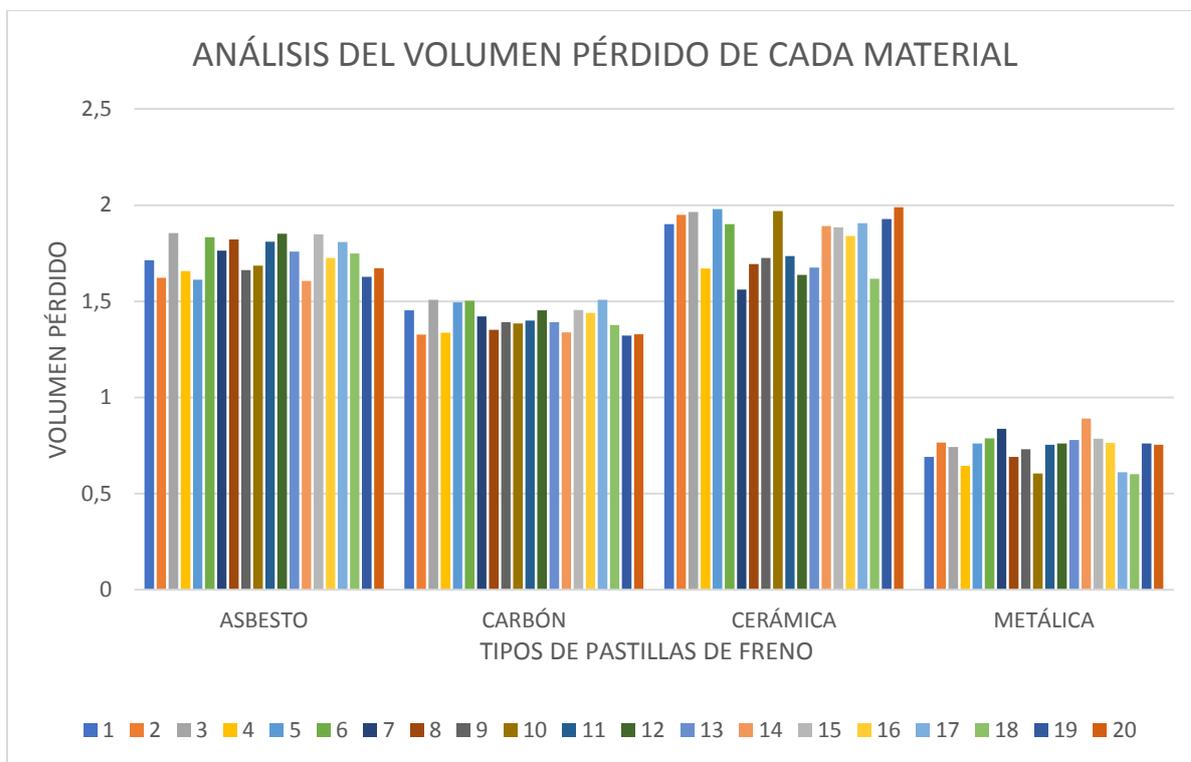
$$\text{Volumen cm}^3 = \frac{\text{masa perdida (gr)}}{\text{densidad } \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}\right)} \quad [4.5]$$

La siguiente tabla representa los resultados calculados donde se puede analizar el desgaste ocasionado en las pastillas de freno representado en pérdidas de volumen:

**Tabla 4.15** Resultados expresados en pérdida de volumen

N. PROBETA	ASBESTO (cm <sup>3</sup> )	CARBÓN (cm <sup>3</sup> )	CERÁMICA (cm <sup>3</sup> )	METÁLICA (cm <sup>3</sup> )
1	1,713	1,453	1,902	0,6900
2	1,622	1,327	1,949	0,7660
3	1,855	1,507	1,965	0,7418
4	1,657	1,337	1,670	0,6442
5	1,613	1,494	1,979	0,7605
6	1,833	1,502	1,901	0,7858
7	1,763	1,422	1,561	0,8361
8	1,821	1,351	1,693	0,6906
9	1,668	1,392	1,725	0,7299
10	1,685	1,384	1,969	0,6037
11	1,810	1,399	1,735	0,7542
12	1,851	1,452	1,637	0,7602
13	1,759	1,392	1,675	0,7775
14	1,606	1,338	1,892	0,8902
15	1,848	1,454	1,884	0,7847
16	1,725	1,440	1,840	0,7627
17	1,809	1,507	1,907	0,6104
18	1,749	1,377	1,618	0,6006
19	1,627	1,322	1,928	0,7596
20	1,672	1,329	1,990	0,7541

## 4.6 INTERPRETACIÓN DE DATOS



**Figura 4.9** Análisis en barras del volumen perdido de cada material expresado en  $\text{cm}^3$

Con los valores obtenidos de pérdida de volumen de cada tipo de pastilla de freno se pudo realizar la figura 4.9 para poder apreciar de mejor manera el desgaste sufrido por cada material.

Para poder representar el desgaste en porcentaje se realizó el promedio de masa inicial, masa final, masa pérdida y el volumen perdido como se indica en la tabla 4.16, para ello fue necesario calcular el volumen promedio inicial y el volumen promedio final de cada probeta.

**Tabla 4.16** Promedio de volumen perdido de las diferentes pastillas de freno

PASTILLAS	PROMEDIO VOLUMEN INICIAL	PROMEDIO VOLUMEN FINAL	PROMEDIO VOLUMEN PÉRDIDO
Asbesto	20,625 $\text{cm}^3$	18,916 $\text{cm}^3$	1,709 $\text{cm}^3$
Carbón	24,385 $\text{cm}^3$	22,976 $\text{cm}^3$	1,409 $\text{cm}^3$
Cerámicas	17,529	15,679	1,85
Metálicas	16,875	16,177	0,70

El porcentaje de desgaste que sufre cada material se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ desgaste} = \frac{\text{Volumen inicial} - \text{Volumen final}}{\text{Volumen inicial}} * 100 \quad [4.6]$$

Procedimos a calcular el porcentaje de desgaste de cada material de las pastillas de freno de la siguiente manera:

Asbesto:

$$\% \text{ desgaste asbesto} = \frac{20.625 - 18.916}{20.625} * 100$$

$$\% \text{ desgaste asbesto} = 8.28 \%$$

Carbón:

$$\% \text{ desgaste carbón} = \frac{24.385 - 22.976}{24.385} * 100$$

$$\% \text{ desgaste carbón} = 5.78\%$$

Cerámicas:

$$\% \text{ desgaste cerámicas} = \frac{17.529 - 15.679}{17.529} * 100$$

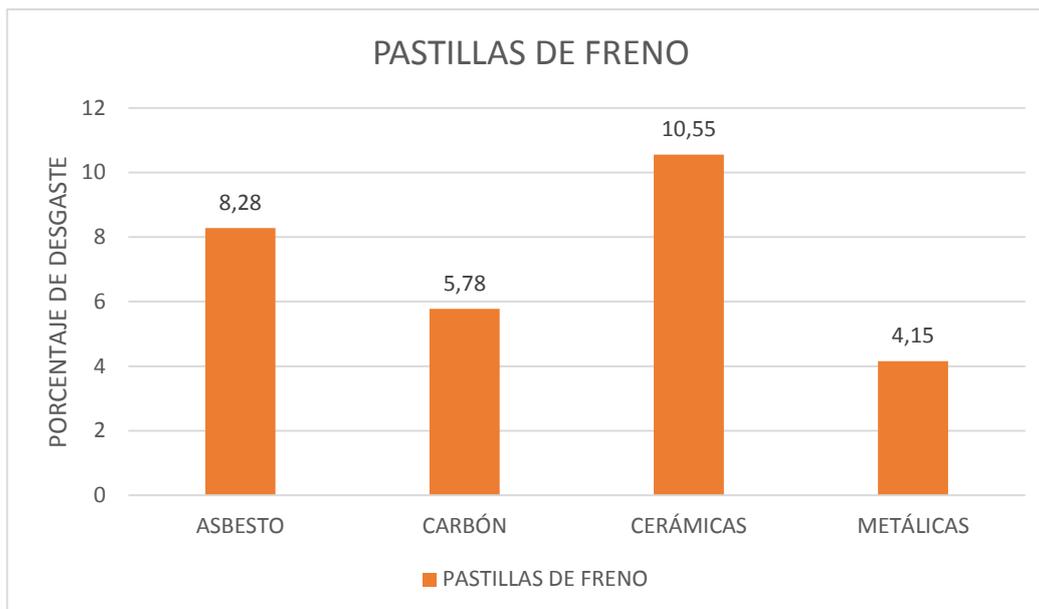
$$\% \text{ desgaste cerámicas} = 10,553 \%$$

Metálicas:

$$\% \text{ desgaste metálicas} = \frac{16.875 - 16.177}{16.875} * 100$$

$$\% \text{ desgaste metálicas} = 4.148 \%$$

Luego se comparó los porcentajes de pérdida de masa en cuadros de barra para poder apreciarlos de mejor manera:



**Figura 4.10** Porcentaje de desgaste de cada tipo de pastilla de freno

En la figura 4.10 se puede apreciar un mayor desgaste en las pastillas de freno de tipo cerámicas con un 10.55%, es decir son las más propensas a sufrir el desgaste por abrasión; sin embargo, no es tan grande la diferencia con las pastillas tipo asbesto ya que su porcentaje de desgaste fue de 8.28%. A continuación, se encuentran las pastillas de freno de carbón con un desgaste del 5.78% y finalmente las más resistentes a la abrasión fueron las pastillas de freno metálicas con un desgaste de 4,15%.

Posteriormente, se analizó las características de cada tipo de pastillas de freno y las ventajas y desventajas que posee cada una de ellas.

#### **4.6.1 PASTILLAS METÁLICAS**

Este tipo de pastilla está compuesta por metales como hierro, cobre y bronce; su porcentaje es lo que va a dar las características de estas pastillas y se caracterizan por tener gran resistencia a la abrasión por lo que suelen durar mucho más tiempo que los otros tipos de materiales, pero esto a la vez es desventajoso debido a que su extrema dureza suele dañar los discos de freno. Estas ofrecen un mejor rendimiento de frenado a un rango más amplio de condiciones y temperaturas, debido a que están compuestas de metales que ayudan a disipar de forma más rápida el calor

Los conductores impulsados por el rendimiento prefieren las pastillas de freno metálicas porque ofrecen un mejor rendimiento de frenado en un rango mucho más amplio de temperaturas y condiciones extremas. Debido a que los metales al ser buenos conductores del calor tienden a resistir más temperatura y al mismo tiempo ayudan a los sistemas de frenado a enfriarse más rápidamente; sin embargo, sus desventajas es que tienden a ser ruidosas y se demoran en asentarse teniendo menor adherencia al inicio de la conducción.

#### **4.6.2 PASTILLAS DE ASBESTO**

Este es un material que se ha dejado de usar en muchos países debido a que investigaciones revelan que es cancerígeno altamente potente por lo cual su uso no es recomendado; como resultado el asbesto fue sustituido por pastillas de freno orgánicas sin asbesto. Estas suelen producir una menor cantidad de polvo que las pastillas de freno metálicas y carbón y se las encuentran en el mercado a precios sumamente bajos; sin embargo, estas pastillas no son recomendadas en vehículos pesados y de alto rendimiento debido a que no generan gran cantidad de fricción por lo que es adecuada para automóviles que tengan una conducción normal, una gran ventaja es que no suelen producir ruido y no desgastan los discos de freno de los vehículos, estas se desgastan mucho más rápido que otras pastillas por lo que deben reemplazarse más frecuentemente.

#### **4.6.3 PASTILLAS DE CARBÓN**

Las pastillas de carbón están conformadas por compuestos de carbono-carbono conteniendo sus fibras en una matriz en conjunto con aditivos menores. Este tipo de pastillas tienen una baja fricción y una resistencia media frente a las pastillas metálicas y cerámicas en frío, pero en altas temperaturas mantienen una buena fricción y desempeño.

Su principal inconveniente es que producen un polvo de color oscuro que se adhiere con facilidad a los demás elementos del vehículo; sin embargo, son las más utilizadas en el medio por su precio moderado y no emitir ruidos.

#### **4.6.4 PASTILLAS CERÁMICAS**

Otra opción son las pastillas de freno cerámicas, estas presentan incrustaciones de cobre para mejorar su fricción y conductividad térmica, estas pastillas son muy silenciosas al momento del frenado y en cuanto a temperatura estas disipan de mejor manera el calor que las pastillas de freno orgánicas y son mucho más confiables al momento de la conducción, otra ventaja es que producen un polvo de color claro no perceptible y que no se adhiere con facilidad al vehículo. Además, estas no causan tanto daño a los otros elementos del sistema de frenos y pueden utilizarse en condiciones de conducción extremas.

Su principal limitación es el costo que estas tienen con respecto a las otras pastillas de freno.

### **4.7 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS**

Para la validación de datos se realizó pruebas de hipótesis de medias muestrales para cada tipo de pastillas de freno utilizando el programa Statgraphics Centurión XV.

#### **4.7.1 PASTILLAS DE ASBESTO**

Para las pastillas de freno de asbesto se tomó como hipótesis nula que el volumen desgastado tras realizarse el ensayo abrasivo es igual a  $1,725 \text{ cm}^3$  resultado que fue arrojado del desgaste de una pastilla de freno.

Las condiciones de la prueba de hipótesis son las siguientes:

Volumen desgastado de las pastillas de asbesto  $u < 1.725$

Volumen desgastado de las pastillas de asbesto  $u > 1.725$

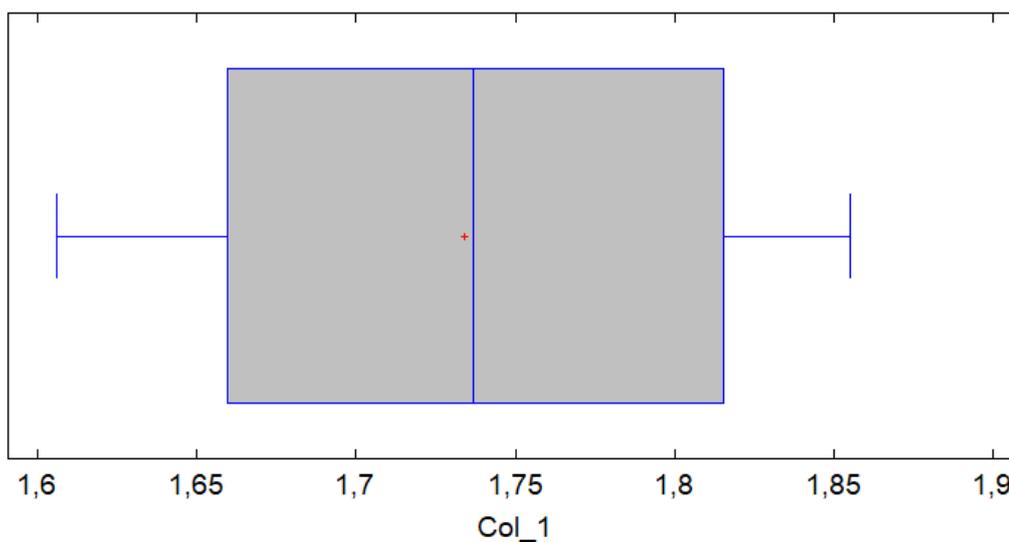
Volumen desgastado de las pastillas de asbesto  $u \neq 1.725$

Los datos utilizados para la prueba de hipótesis son el volumen desgastado indicado en la tabla 4.15

A continuación, en la tabla 4.17 se muestra el resumen estadístico proporcionado por el programa Statgraphics Centurión XV.

**Tabla 4.17** Resumen estadístico de las pastillas de asbesto

Recuento	20
Promedio	1,734
Desviación Estándar	0,0872643
Coefficiente de Variación	5,03%
Mínimo	1,606
Máximo	1,855
Rango	0,249
Sesgo Estandarizado	-0,049273
Curtosis Estandarizada	-1,36113



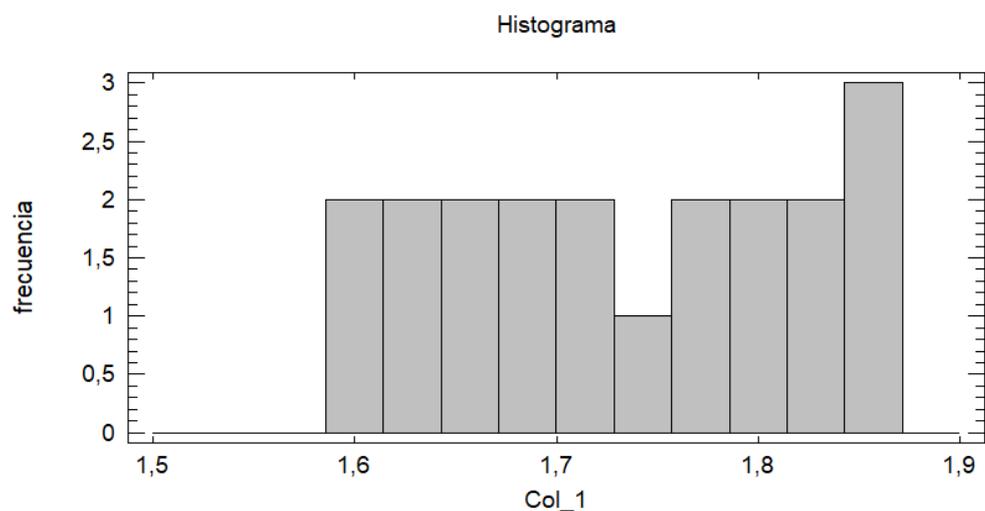
**Figura 4.11** Gráfico cajas y bigotes pastillas de freno de asbesto

La figura 4.11 nos muestra el gráfico de cajas y bigotes desarrollado en el programa Statgraphics y se observa que si existe simetría en los datos obtenidos de los ensayos.

A continuación, se muestra la tabla 4.18 de frecuencias de las pastillas de freno de asbesto.

**Tabla 4.18** Tabla de frecuencias de pastillas de freno de asbesto

Clase	Límite inferior	Límite superior	Punto Medio	Frecuencia	Frecuencia Relativa	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Rel. Acum.
	menor o igual	1,5		0	0	0	0
1	1,5	1,52857	1,51429	0	0,0000	0	0,0000
2	1,52857	1,55714	1,54286	0	0,0000	0	0,0000
3	1,55714	1,58571	1,57143	0	0,0000	0	0,0000
4	1,58571	1,61429	1,6	2	0,1000	2	0,1000
5	1,61429	1,64286	1,62857	2	0,1000	4	0,2000
6	1,64286	1,67143	1,65714	2	0,1000	6	0,3000
7	1,67143	1,7	1,68571	2	0,1000	8	0,4000
8	1,7	1,72857	1,71429	2	0,1000	10	0,5000
9	1,72857	1,75714	1,74286	1	0,0500	11	0,5500
10	1,75714	1,78571	1,77143	2	0,1000	13	0,6500
11	1,78571	1,81429	1,8	2	0,1000	15	0,7500
12	1,81429	1,84286	1,82857	2	0,1000	17	0,8500
13	1,84286	1,87143	1,85714	3	0,1500	20	1,0000
14	1,87143	1,9	1,88571	0	0,0000	20	1,0000
	mayor de	1,9		0	0,0000	20	1,0000



**Figura 4.12** Histograma de las pastillas de freno de asbesto

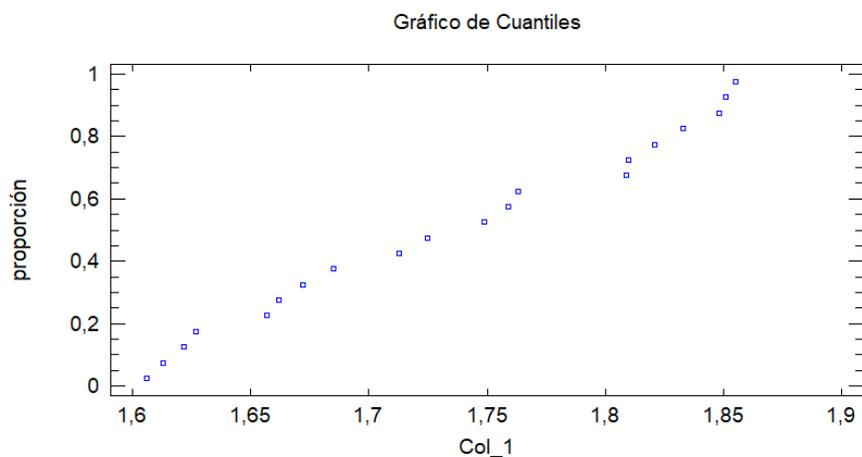
La figura 4.12 muestra el histograma de datos de las pastillas de freno de asbesto analizados.

**Diagrama de Tallo y Hoja para Col\_1: unidad = 0,01 1|2 representa 0,12**

2	16 01
4	16 22
5	16 5
7	16 67
8	16 8
9	17 1
10	17 2
10	17 45
8	17 6
7	17
7	18 01
5	18 23
3	18 455

**Figura 4.13** Diagrama de Tallo y Hoja de las pastillas de freno de asbesto

La figura 4.13 indica el diagrama de tallo y hoja presentado por el programa Statgraphics Centurión XV.



**Figura 4.14** Gráfico de cuantiles de las pastillas de freno de asbesto

La figura 4.14 presenta el gráfico de cuantiles de las pastillas de freno de asbesto.

Se realizó la prueba de hipótesis mostrando los siguientes resultados:

Media muestral = 1,734

Desviación estándar muestral = 0,08726

Tamaño de muestra = 20

Intervalos de confianza del 95,0 % para la media: 1,734 +/- 0,40839 [1,69316;1,77484]

Hipótesis Nula= $1,725$

Alternativa: no igual

Estadístico t calculado =  $0,461256$

Valor-P =  $0,649851$

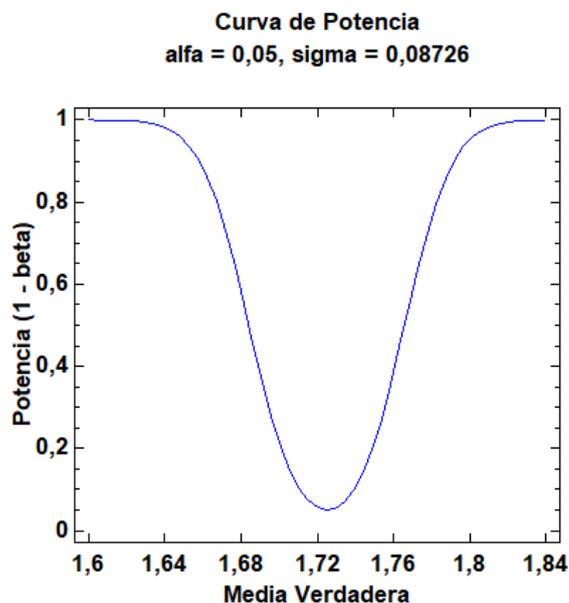
No rechazar la hipótesis nula para  $\alpha = 0,05$ .

Este análisis muestra los resultados de realizar una prueba de hipótesis relativa a la media ( $\mu$ ) de una distribución normal. Las dos hipótesis a ser evaluadas aquí son:

Hipótesis nula:  $\mu = 1,725$

Hipótesis alterna:  $\mu \neq 1,725$

Dada una muestra de 20 observaciones con una media de  $1,734$  y una desviación estándar de  $0,08726$ , el estadístico t calculado es igual a  $0,461256$ . Puesto que el valor P para la prueba es mayor o igual que  $0,05$ , no puede rechazarse la hipótesis nula con un  $95,0\%$  de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de  $\mu$  soportados por los datos caen entre  $1,69316$  y  $1,77484$ .



**Figura 4.15** Curva de potencia de pastillas de asbesto

La figura 4.15 muestra la curva de potencia para las pastillas de freno de asbesto.

#### 4.7.2 PASTILLAS DE CARBÓN

Para las pastillas de freno de carbón la hipótesis nula de volumen desgastado que se tomó fue  $1,399 \text{ cm}^3$  resultado que fue arrojado del desgaste de una pastilla de freno. Las condiciones de la prueba de hipótesis son las siguientes:

Volumen desgastado de las pastillas de carbón  $u < 1.399$

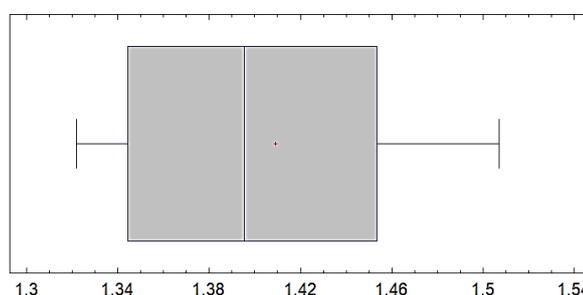
Volumen desgastado de las pastillas de carbón  $u > 1.399$

Volumen desgastado de las pastillas de carbón  $u \neq 1.399$

La tabla 4.19 que se muestra a continuación muestra el resumen estadístico arrojado por el programa Statgraphics.

**Tabla 4.19** Resumen estadístico de las pastillas de carbón

Recuento	20
Promedio	1,40895
Desviación Estándar	0,0643309
Coefficiente de Variación	4,57%
Mínimo	1,322
Máximo	1,507
Rango	0,185
Sesgo Estandarizado	0,358167
Curtosis Estandarizada	-1,1803



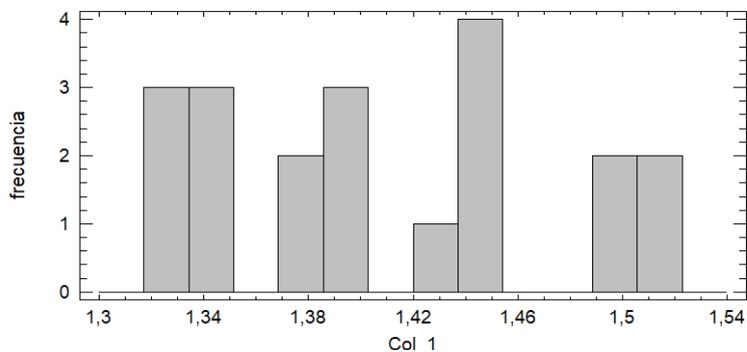
**Figura 4.16** Gráfico de cajas y bigotes de pastillas de freno de carbón

La figura 4.16 muestra el gráfico de cajas y bigotes de las pastillas de freno de carbón lo cual nos permite analizar gráficamente los datos a través de los cuantiles observando que existe asimetría hacia la izquierda de los datos obtenidos de los ensayos.

A continuación, se indica la tabla 4.20 de frecuencias la cual nos permite analizar los datos numéricos agrupados en conjuntos.

**Tabla 4.20** Tabla de frecuencias de pastillas de freno de carbón

	Límite	Límite			Frecuencia	Frecuencia	Frecuencia
Clase	Inferior	Superior	Punto Medio	Frecuencia	Relativa	Acumulada	Rel. Acum.
	menor o igual	1,3		0	0	0	0
1	1,3	1,31714	1,30857	0	0	0	0
2	1,31714	1,33429	1,32571	3	0,15	3	0,15
3	1,33429	1,35143	1,34286	3	0,15	6	0,3
4	1,35143	1,36857	1,36	0	0	6	0,3
5	1,36857	1,38571	1,37714	2	0,1	8	0,4
6	1,38571	1,40286	1,39429	3	0,15	11	0,55
7	1,40286	1,42	1,41143	0	0	11	0,55
8	1,42	1,43714	1,42857	1	0,05	12	0,6
9	1,43714	1,45429	1,44571	4	0,2	16	0,8
10	1,45429	1,47143	1,46286	0	0	16	0,8
11	1,47143	1,48857	1,48	0	0	16	0,8
12	1,48857	1,50571	1,49714	2	0,1	18	0,9
13	1,50571	1,52286	1,51429	2	0,1	20	1
14	1,52286	1,54	1,53143	0	0	20	1
	mayor de	1,54		0	0	20	1



**Figura 4.17** Histograma de las pastillas de freno de carbón

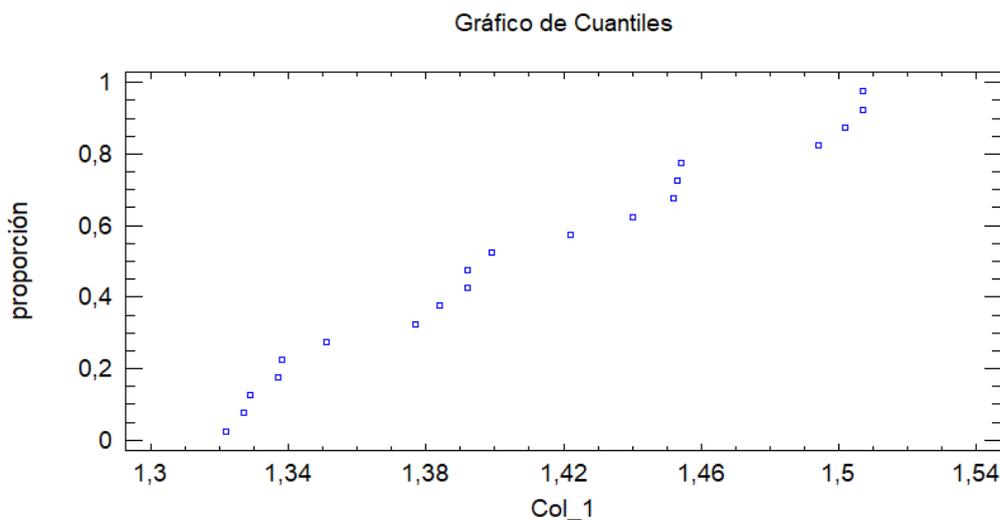
La figura 4.17 muestra mediante barras la frecuencia de desgaste que sufrieron las pastillas de freno de carbón.

**Diagrama de Tallo y Hoja para Col\_1: unidad = 0,01 1|2 representa 0,12**

5	13 22233
6	13 5
7	13 7
(4)	13 8999
9	14
9	14 2
8	14 4555
4	14
4	14 9
3	15 000

**Figura 4.18** Diagrama de Tallo y Hoja de las pastillas de freno de carbón

La figura 4.18 muestra el diagrama de tallo y hoja de las pastillas de carbón.



**Figura 4.19** Gráfico de cuantiles de las pastillas de freno de asbesto

La figura 4.19 muestra el gráfico de cuantiles del volumen desgastado de las pastillas de freno de carbón.

Se realizó la prueba de hipótesis obteniendo los siguientes resultados:

Media muestral = 1,40895

Desviación estándar muestral = 0,0643309

Tamaño de muestra = 20

Intervalos de confianza del 95,0 % para la media: 1,40895 +/- 0,0301079 [1,37884;1,43906]

Hipótesis Nula= 1,399

Alternativa: no igual

Estadístico t calculado = 0,691701

Valor-P = 0,497491

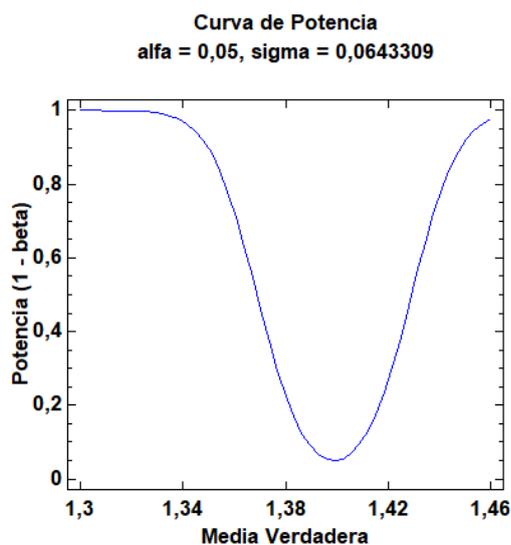
No rechazar la hipótesis nula para alfa = 0,05.

Este análisis muestra los resultados de realizar una prueba de hipótesis relativa a la media ( $\mu$ ) de una distribución normal. Las dos hipótesis a ser evaluadas aquí son:

Hipótesis nula:  $\mu = 1,399$

Hipótesis alterna:  $\mu \neq 1,399$

Dada una muestra de 20 observaciones con una media de 1,40895 y una desviación estándar de 0,0643309, el estadístico t calculado es igual a 0,691701. Puesto que el valor-P para la prueba es mayor o igual que 0,05 no puede rechazarse la hipótesis nula con un 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de  $\mu$  soportados por los datos caen entre 1,37884 y 1,43906.



**Figura 4.20** Curva de potencia de pastillas de asbesto

La figura 4.20 muestra la curva de potencia desarrollada en el programa Statgraphics

### 4.7.3 PASTILLAS METÁLICAS

Para las pastillas de freno metálicas se tomó el volumen  $0,7541 \text{ cm}^3$  como hipótesis nula y es el resultado obtenido de la última prueba realizada con este tipo de pastilla. En la tabla 4.21 se especifican las condiciones a demostrarse en la prueba de hipótesis.

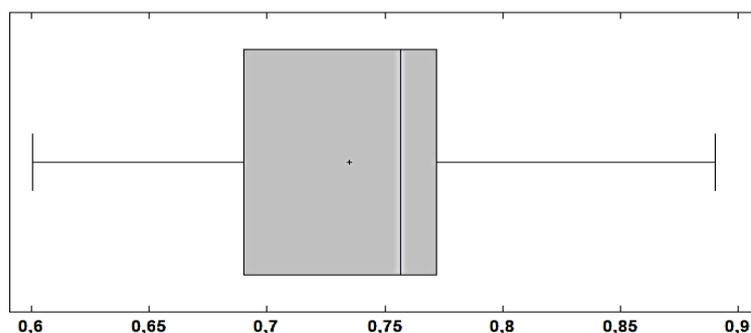
**Tabla 4.21** Condiciones de la prueba de hipótesis

Condición a probarse	Hipótesis alternativa
u es menor a la media del volumen desgastado	$u < 0,7541$
u es mayor a la media del volumen desgastado	$u > 0,7541$
u es diferente a la media del volumen desgastado	$u \neq 0,7541$

Los datos utilizados para la prueba de hipótesis son el volumen desgastado indicado en la tabla 4.15. A continuación, en la tabla 4.22 se puede apreciar el resumen estadístico arrojado por el programa Statgraphics Centurión XV.

**Tabla 4.22** Resumen estadístico para la pérdida de volumen de las pastillas metálicas

Recuento	20
Promedio	0,73514
Desviación Estándar	0,0756232
Coefficiente de Variación	10,2869%
Mínimo	0,6006
Máximo	0,8902
Rango	0,2896
Sesgo Estandarizado	-0,588448
Curtosis Estandarizada	0,0869661



**Figura 4.21** Gráfico de caja y bigotes de las pastillas de freno metálicas

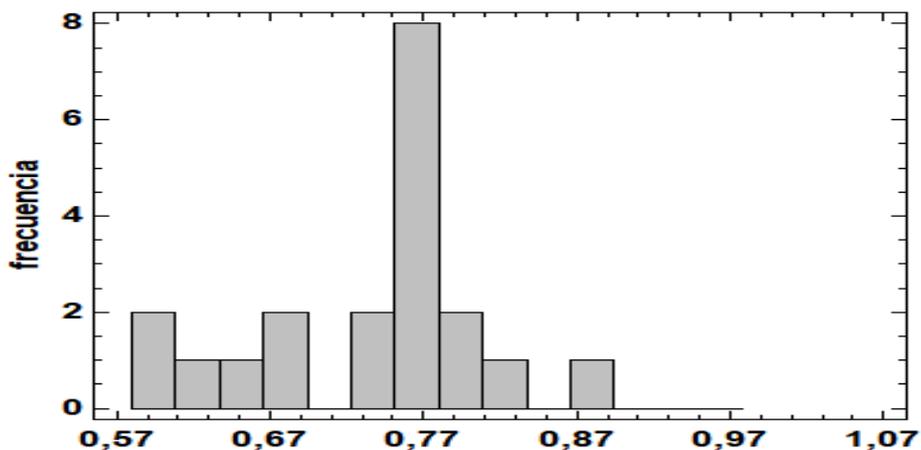
La figura 4.21 muestra el gráfico representativo de este resumen estadístico que permite ver si los datos del sesgo estandarizado y la curtosis se encuentran dentro del rango de una distribución normal que son de -2 a +2. En este caso, el valor del sesgo estandarizado y la curtosis se encuentran dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

Como consecuente se muestra la tabla 4.23 de frecuencias de las pastillas de freno metálicas:

**Tabla 4.23** Tabla de Frecuencias para la pérdida de volumen de las pastillas metálicas

	Límite	Límite			Frecuencia	Frecuenci	Frecuenci
Clase	Inferior	Superior	Punto Medio	Frecuenci	Relativa	Acumulad	Rel. Acum.
	menor o igual	0,58		0	0,0000	0	0,0000
1	0,58	0,608571	0,594286	2	0,1000	2	0,1000
2	0,608571	0,637143	0,622857	1	0,0500	3	0,1500
3	0,637143	0,665714	0,651429	1	0,0500	4	0,2000
4	0,665714	0,694286	0,68	2	0,1000	6	0,3000
5	0,694286	0,722857	0,708571	0	0,0000	6	0,3000
6	0,722857	0,751429	0,737143	2	0,1000	8	0,4000
7	0,751429	0,78	0,765714	8	0,4000	16	0,8000
8	0,78	0,808571	0,794286	2	0,1000	18	0,9000
9	0,808571	0,837143	0,822857	1	0,0500	19	0,9500
10	0,837143	0,865714	0,851429	0	0,0000	19	0,9500
11	0,865714	0,894286	0,88	1	0,0500	20	1,0000
12	0,894286	0,922857	0,908571	0	0,0000	20	1,0000
13	0,922857	0,951429	0,937143	0	0,0000	20	1,0000
14	0,951429	0,98	0,965714	0	0,0000	20	1,0000
	mayor de	0,98		0	0,0000	20	1,0000

Media = 0,73514 Desviación Estándar = 0,0756232



**Figura 4.22** Histograma para la pérdida de volumen de las pastillas de freno metálicas

Con los datos de la tabla 4.23 se obtiene el Histograma donde se muestra los datos y sus proporciones en cada intervalo como se observa en la figura 4.22.

```

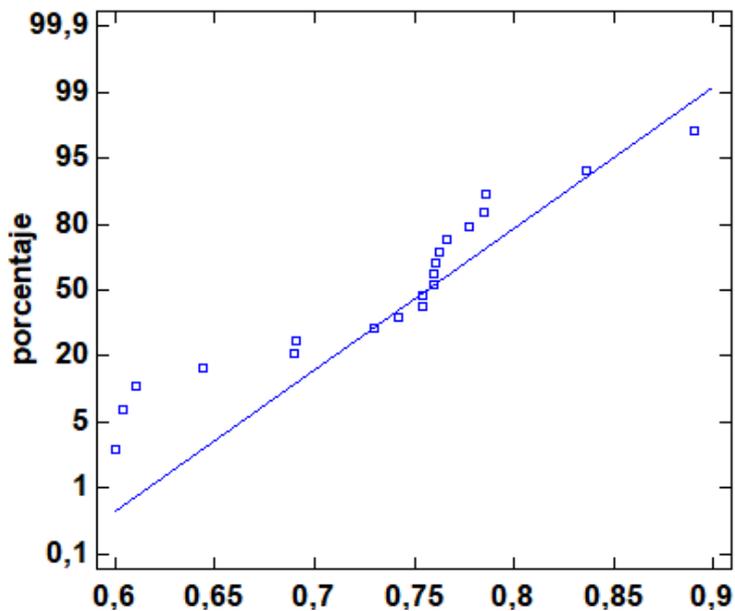
4  6|0014
6  6|99
8  7|24
(10) 7|5556666788
2  8|3
1  8|9|

```

**Figura 4.23** Diagrama de Tallo y Hoja para: unidad = 0,01 1|2 representa 0,12

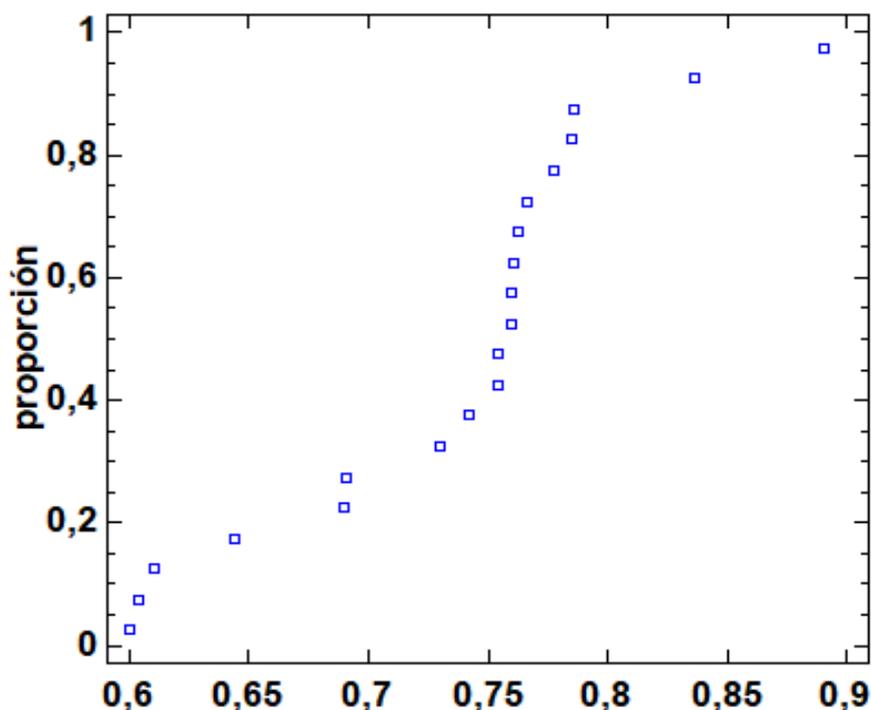
La figura 4.23 muestra el diagrama de tallo y hoja donde los tallos se etiquetan utilizando uno o más dígitos indicadores para los valores que caen dentro de ese intervalo. En cada renglón los valores individuales se representan por un dígito (llamado hoja) a la derecha de la línea vertical.

Esto resulta en un histograma para los datos del cual uno puede recuperar al menos dos dígitos significativos de cada valor. Si hay algunos puntos muy alejados del resto (llamados puntos lejanos) se colocan en tallos alto y bajo separados.



**Figura 4.24** Gráfico de probabilidad normal de las pastillas de freno metálicas

En este caso no hay puntos alejados. Además, los datos del diagrama de tallo y hoja se pueden apreciar en el gráfico de probabilidad normal mostrado en la figura 4.24.



**Figura 4.25** Gráfico de Cuantiles para la pérdida de volumen de las pastillas de freno metálicas

La figura 4.25 muestra el gráfico de cuantiles del volumen desgastado de las pastillas de freno metálicas.

Con los datos proporcionados de las pruebas realizadas al programa STATGRAFICS CENTURION XV se obtuvo la siguiente prueba de hipótesis:

Media muestral = 0,73514

Desviación estándar muestral = 0,075632

Tamaño de muestra = 20

Intervalos de confianza del 95,0 % para la media: 0,7351 +/- 0,0353928  
[0,699747;0,770533]

Hipótesis Nula= 0,7541

Alternativa: no igual

Estadístico t calculado = -1,12124

Valor-P = 0,276158

No rechazar la hipótesis nula para alfa = 0,05.

Este análisis muestra los resultados de realizar una prueba de hipótesis relativa a la media ( $\mu$ ) de una distribución normal.

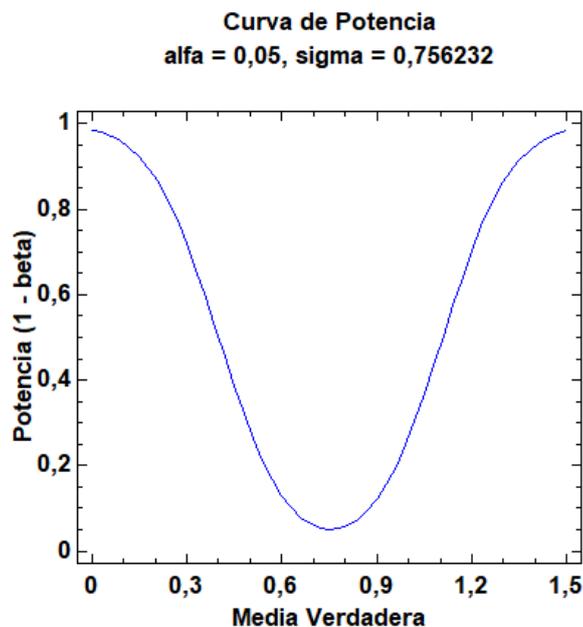
Las dos hipótesis a ser evaluadas aquí son:

Hipótesis nula:  $\mu = 0,7541$

Hipótesis alterna:  $\mu \neq 0,7541$

Dada una muestra de 20 observaciones con una media de 0,73514 y una desviación estándar de 0,0756232 el estadístico t calculado es igual a -1,12124. Puesto que el valor-P para la prueba es mayor o igual que 0,05 no puede rechazarse la hipótesis nula con un 95,0% de nivel de confianza para los usuarios.

El intervalo de confianza muestra que los valores de  $\mu$  soportados por los datos caen entre 0,699747 y 0,770533.



**Figura 4.26** Curva de potencia para la prueba de hipótesis de las pastillas de freno metálicas

Tomando todos los datos obtenidos finalmente la figura 4.26 muestra la curva de potencia para la prueba de hipótesis de las pastillas de freno metálicas.

#### 4.7.4 PASTILLAS CERÁMICAS

Para las pastillas de freno de cerámica se tomó el volumen desgastado de una probeta al azar del ensayo abrasivo siendo  $1,884\text{cm}^3$  estableciéndolo como hipótesis nula.

En la tabla 4.24 se especifican las condiciones a demostrarse en la prueba de hipótesis.

**Tabla 4.24** Condiciones de la prueba de hipótesis

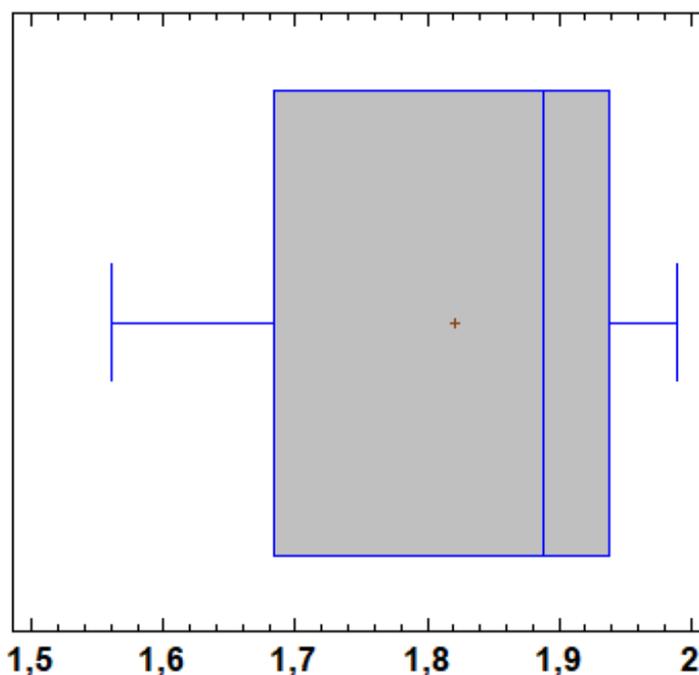
Condición a probarse	Hipótesis alternativa
u es menor a la media del volumen desgastado	$u < 1,884$
u es mayor a la media del volumen desgastado	$u > 1,884$
u es diferente a la media del volumen desgastado	$u \neq 1,884$

Los datos utilizados para la prueba de hipótesis son el volumen desgastado indicado en la tabla 4.15

En la tabla se puede apreciar el resumen estadístico arrojado por el programa Statgraphics Centurión XV.

**Tabla 4.25** Resumen estadístico para la pérdida de volumen de las pastillas cerámicas

Recuento	20
Promedio	1,821
Desviación Estándar	0,140207
Coefficiente de Variación	7,69947%
Mínimo	1,561
Máximo	1,99
Rango	0,429
Sesgo Estandarizado	-0,841708
Curtosis Estandarizada	-1,23005



**Figura 4.27** Gráfico de caja y bigotes para la pérdida de volumen de las pastillas cerámicas.

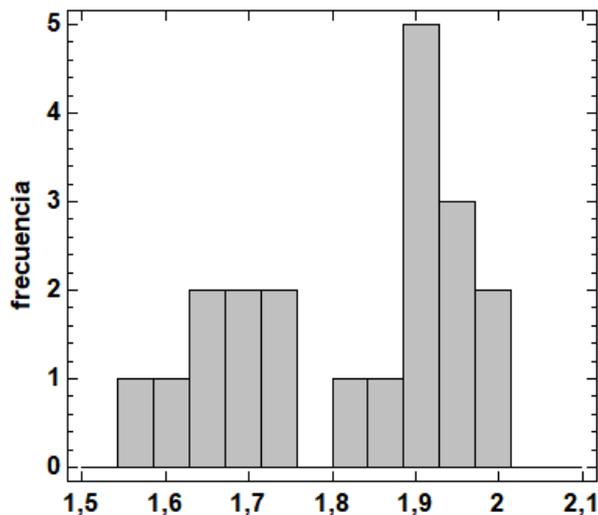
En este caso, el valor del sesgo estandarizado y de la curtosis se encuentran dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal. Esto se puede apreciar en el gráfico de cajas y bigotes mostrado en la figura 4.27.

A continuación, se detalla la tabla 4.26 de frecuencias para el análisis de la pérdida de volumen en las pastillas cerámicas.

**Tabla 4.26** Tabla de frecuencias para la pérdida de volumen de las pastillas cerámicas

	Límite	Límite			Frecuencia	Frecuencia	Frecuencia
Clase	Inferior	Superior	Punto Medio	Frecuencia	Relativa	Acumulada	Rel. Acum.
	menor o igual	1,5		0	0,0000	0	0,0000
1	1,5	1,54286	1,52143	0	0,0000	0	0,0000
2	1,54286	1,58571	1,56429	1	0,0500	1	0,0500
3	1,58571	1,62857	1,60714	1	0,0500	2	0,1000
4	1,62857	1,67143	1,65	2	0,1000	4	0,2000
5	1,67143	1,71429	1,69286	2	0,1000	6	0,3000
6	1,71429	1,75714	1,73571	2	0,1000	8	0,4000
7	1,75714	1,8	1,77857	0	0,0000	8	0,4000
8	1,8	1,84286	1,82143	1	0,0500	9	0,4500
9	1,84286	1,88571	1,86429	1	0,0500	10	0,5000
10	1,88571	1,92857	1,90714	5	0,2500	15	0,7500
11	1,92857	1,97143	1,95	3	0,1500	18	0,9000
12	1,97143	2,01429	1,99286	2	0,1000	20	1,0000
13	2,01429	2,05714	2,03571	0	0,0000	20	1,0000
14	2,05714	2,1	2,07857	0	0,0000	20	1,0000
	mayor de	2,1		0	0,0000	20	1,0000

Media = 1,821 Desviación Estándar = 0,140207



**Figura 4.28** Histograma para la pérdida de volumen de las pastillas cerámicas

Con los datos de la tabla 4.26 se obtiene el Histograma donde se muestra los datos y sus proporciones en cada intervalo como se observa en la figura 4.28.

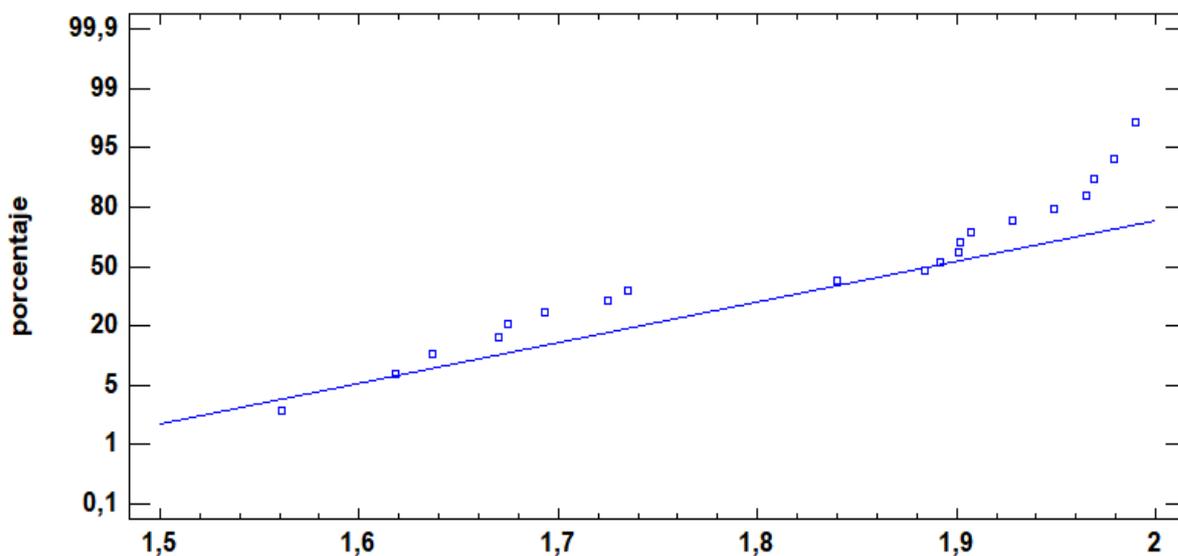
1	15 6
3	16 13
6	16 779
8	17 23
8	17
9	18 4
(2)	18 89
9	19 00024
4	19 6679

**Figura 4.29** Diagrama de tallo y hoja para la pérdida de volumen de las pastillas cerámicas

En la figura 4.29 se muestra el diagrama de tallo y hoja donde el rango de los datos se ha dividido en 9 intervalos (llamados tallos) cada uno representado por un renglón en la tabla.

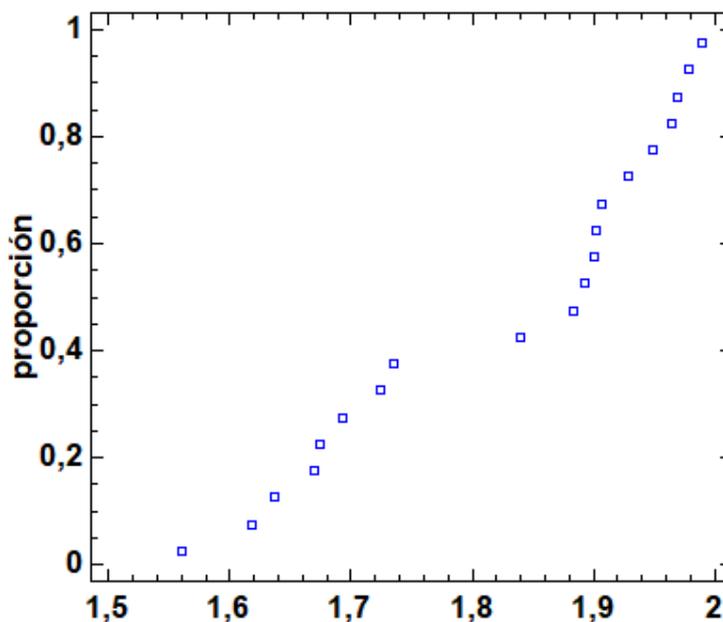
Los tallos se etiquetan utilizando uno o más dígitos indicadores para los valores que caen dentro de ese intervalo. En cada renglón los valores individuales se representan por un dígito (llamado hoja) a la derecha de la línea vertical. Esto resulta en un histograma para los datos del cual uno puede recuperar al menos dos dígitos significativos de cada valor. Si hay

algunos puntos muy alejados del resto (llamados puntos lejanos) se colocan en tallos alto y bajo separados.



**Figura 4.30** Gráfico de probabilidad normal para la pérdida de volumen de las pastillas cerámicas

En este caso no hay puntos alejados. Además, los datos del diagrama de tallo y hoja se pueden apreciar en el gráfico de probabilidad normal mostrado en la figura 4.30.



**Figura 4.31** Gráfico de Cuantiles para la pérdida de volumen de las pastillas cerámicas

La figura 4.31 muestra el gráfico de cuantiles del volumen desgastado de las pastillas de freno de cerámica.

Con los datos ingresados al programa STATGRAPHICS CENTURION XV se obtuvo la siguiente prueba de hipótesis:

Media muestral = 1,821

Desviación estándar muestral = 0,14027

Tamaño de muestra = 20

Intervalos de confianza del 95,0 % para la media: 1,821 +/- 0,0664909 [1,75451;1,88749]

Hipótesis Nula= 1,884

Alternativa: no igual

Estadístico t calculado = -1,98314

Valor-P = 0,0619963

No rechazar la hipótesis nula para alfa = 0,05.

Este análisis muestra los resultados de realizar una prueba de hipótesis relativa a la media ( $\mu$ ) de una distribución normal. Las dos hipótesis a ser evaluadas aquí son:

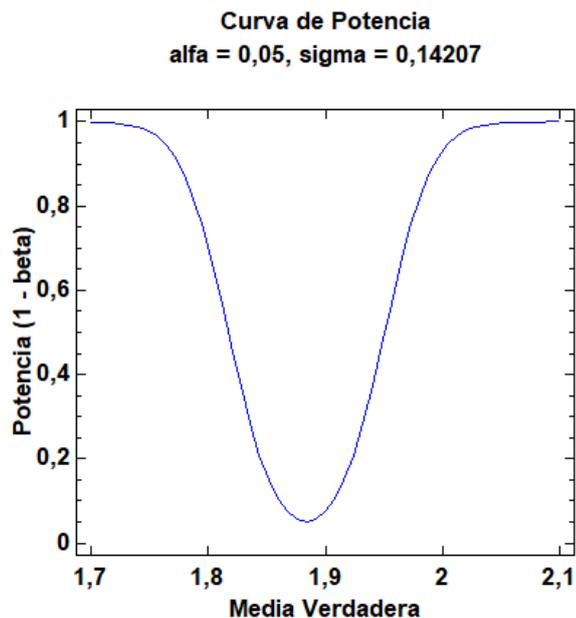
Hipótesis nula:  $\mu = 1,884$

Hipótesis alterna:  $\mu \neq 1,884$

Dada una muestra de 20 observaciones con una media de 1,821 y una desviación estándar de 0,14207, el estadístico t calculado es igual a -1,98314.

Puesto que el valor-P para la prueba es mayor o igual que 0,05 no puede rechazarse la hipótesis nula con un 95,0% de nivel de confianza.

El intervalo de confianza muestra que los valores de  $\mu$  soportados por los datos caen entre 1,75451 y 1,88749.



**Figura 4.32** Curva de potencia para la prueba de hipótesis de las pastillas cerámicas

Tomando los datos obtenidos anteriormente el programa STATGRAPHICS CENTURION XV arroja la curva de potencia que se observa en la figura 4.32 para esta prueba de hipótesis.

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

- La norma técnica ASTM G 65 establece parámetros que permite realizar ensayos de abrasión a diferentes materiales mediante la elaboración de una máquina tribológica; esta norma establece la metodología a seguir en los ensayos abrasivos y dicta cinco procedimientos a elegir según la resistencia a la abrasión que posee cada material; para las pastillas de freno se determinó que el procedimiento idóneo es el B.
- El diseño y construcción de la máquina de ensayos de desgaste abrasivo de acuerdo a lo establecido por la norma técnica ASTM G65 fue realizado en referencia a los principales componentes como son el motor trifásico de 1 hp acoplado a una caja reductora de 10 a 1, variador de frecuencia, tolva, arena de otawwa, disco recubierto de caucho con una dureza shore 60, brazo y porta probeta; su diseño fue realizado en el programa SolidWorks y los materiales de construcción fueron elegidos de acuerdo a los parámetros de la norma.
- Con los ensayos realizados a los tipos de pastillas de freno se puede afirmar que las pastillas metálicas son más resistentes a la abrasión teniendo un 4,14% de desgaste mientras que las pastillas de freno de cerámica y de carbón presentan un 10,55% y 5,78% respectivamente; por esta razón son más recomendables para vehículos que están sometidos a largos períodos de trabajo; las pastillas de carbón disponen de una resistencia a la abrasión intermedia y pueden ser utilizadas en vehículos de uso personal o de servicio teniendo presente también el inconveniente del desprendimiento de material de color oscuro que se adhiere a los elementos aledaños al sistema de frenos.

- Las pastillas de freno cerámicas a pesar de su rendimiento superior con respecto a las demás disponen de una resistencia a la abrasión inferior por lo que su mantenimiento es más prematuro y por esta razón se las utiliza en vehículos para competición o vehículos condicionados a mantenimientos más continuos.
- Al realizar la validación de hipótesis por medio del programa estadístico Statgraphics, se pudo comprobar que el volumen desgastado para las pastillas de asbesto es de  $1,725 \text{ cm}^3$ , para las de carbón  $1,399 \text{ cm}^3$ , para las pastillas metálicas  $0,7541 \text{ cm}^3$  y para la cerámica  $1,884 \text{ cm}^3$ , además de verificar que el desgaste producido en todas las probetas de un mismo material sea simétrico.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- En el diseño y construcción de la máquina se recomienda investigar posibles materiales alternos disponibles en el mercado local con características similares a los determinados por la norma técnica ASTM G-65 debido a que ciertos materiales no se distribuyen en el país y para ser importados debe ser en cantidades grandes tornándose costosa su adquisición.
- Con la finalidad de obtener probetas homogéneas durante su preparación se recomienda utilizar máquinas herramientas y verificar sus dimensiones, esto evitará una diferencia relevante en los datos tomados en el pesaje de las probetas.
- La máquina de ensayos de desgaste, al cumplir con la norma ASTM G-65 se puede utilizar en el futuro para ensayos en otros materiales.
- Complementar el análisis de desgaste por abrasión en pastillas de freno mediante el estudio de eficiencias de frenado de acuerdo al material del que se compone cada una de ellas.

## REFERENCIAS

1. Agencia Pública de Noticias del Ecuador y Suramérica. (02 de OCTUBRE de 2014). La mayoría de accidentes de tránsito en Ecuador se debe a fallas humanas, según estudio. ANDES.
2. Aguirre, J. E. (2015). Diseño y construcción de una máquina para medición del desgaste por abrasión según la norma ASTM G-65. Quito-Sangolquí: ESPE.
3. Alzallú Soriano, J. A. (2016). Historia de los frenos en los coches. Publicaciones didácticas, 174.
4. Arisoft Chile. (2019). Productos para escuelas de conductores. Obtenido de <http://www.arisoftchile.com/blog/curso-video-licencia-b-tema-13-conduccion-circunstancias-especiales-conduccion-chile-conduccion-lluvia/>.
5. Asociación de empresas automotrices del Ecuador. (2017). Sector Automotriz en cifras. AEADE, 20.
6. ASTM. (2010). Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. ASTM G-65. West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos: ASTM.
7. Ayala Yandún, D. F. (2018). Diseño e implementación de un sistema de frenos para un vehículo tipo fórmula student. Ibarra: UTN. Obtenido de <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/8087>.
8. Borja, J. C., Fenoll, J., & Seco, J. (2009). Sistema de transmisión y frenado. Iberia: Macmillan.

9. Calero Calero, F. V., & Carrera Guanoluisa, D. A. (2015). Diseño y construcción de una máquina para ensayos en desgaste abrasivo según norma técnica ASTM G65 / COGUANOR 41087 h2. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
10. Calero Calero, F. V., & Carrera Guanoluisa, D. A. (2015). Diseño y construcción de una máquina para ensayos en desgaste abrasivo según norma técnica ASTM G65 / COGUANOR 41087 h2. Riobamba: Escuela Superior Politécnica del Chimborazo.
11. CAPITAL STEEL AND WIRE, INC. . (SF). [www.capitalsteel.net](http://www.capitalsteel.net). Obtenido de [www.capitalsteel.net](http://www.capitalsteel.net): <https://www.capitalsteel.net/news/blog/1018-vs-1020-steel-comparison>.
12. Carroya.com. (25 de 08 de 2016). Carroya.com. Obtenido de Carroya.com: <http://www.carroya.com/noticias/guia-para-conductores/aprenda-como-cuidar-los-frenos-de-su-vehiculo-3496>.
13. Chrysoula, A. (2014). Composites in Automotive Applications: Review on brake pads and discs. Reino Unido: university of bristol.
14. Electrocrea. (2019). Electrocrea. Obtenido de <https://electrocrea.com/products/sensor-de-proximidad-inductivo-npn>.
15. Espinoza Ruiz, S. (2017). Diseño mecánico eléctrico de un tribómetro para ensayos de resistencia al desgaste abrasivo en pastillas de frenos tipo disco según la norma ASTM G65. Chiclayo: Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo.
16. Gachoki, J. J., & Kathenya, D. M. (2011). Desing of brakepad friction material. Nairobi: University of Nairobi.
17. García León, R. A. (2015). Análisis del comportamiento de los frenos de disco de los vehículos a partir de la aceleración del proceso de corrosión. TECNURA, 53-63.

18. González Argudo, J. F., & Ordóñez Ruilova, J. A. (2014). Estudio de los factores que intervienen en los accidentes e infracciones de tránsito ocasionados por los buses de transporte público de pasajeros tipo urbano en la ciudad de Cuenca y planteamiento de la propuesta para disminuirlos. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana .
19. Hasan Öktema, I. U. (2018). Design, construction and performance of a novel brake pad friction tester. *ELSEVIER*, 299-305.
20. León, Y. B. (2013). Diseño y fabricación de máquina de ensayo para desgaste tipo pin - disco abrasivo. Santa Clara: Universidad Central "Marta Abreu".
21. M. Polajnara, M. K.-P. (2017). Friction and wear performance of functionally graded ductile iron for brake pads . *ELSEVIER*, 85-94.
22. Md, M., Mohd, S. K., K.M, M., & Z, F. (2016). A Review Paper on Abrasive Wear Characteristics & Tribological Behavior of Graphite. *International journal of engineering trends and applications*, 27.
23. Menéndez., J. M. (2002). Frenos: Detenerse a tiempo . *TRAFICO DOSSIER*, 8.
24. Molina Arce, C. R. (2010). Adaptación Tecnológica de una Máquina de Ensayos Moore. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
25. Montenegro Montero, M., Navarro Bejarano, J. F., & Rigioni Acuña, G. (2014). Diseño de un banco de pruebas para comparar parámetros de calidad en pastillas de freno de automóviles. San Pedro de Montes de Oca: Universidad de Costa Rica.
26. Nomada store. (2019). Nomada store. Obtenido de <https://nomada-e.com/store/sensores/4-sensor-ultrasonico-de-proximidad.html>.
27. Palacios Quiroz, W. V. (2015). Guía de operación del banco de pruebas de inyectores electrónicos CRDi (MT - 3000). Ibarra : Universidad Técnica del norte.

28. Peña, A. (2002). Caracterización mecánica y tribológica del Al 6061-T651 y del Al 6061-T651 con recubrimiento de fosfato de cromo. México, DF: Instituto Politécnico Nacional.
29. R, S., Vamsi , K., & Anthony, X. (2014). Wear Behavior of Aluminium 6061/Sic/Gr Metal Matrix Composites. *International Journal of Scientific Research*, 148.
30. RENAULT TRUCKS. (2017). Todo sobre el filtro de aire. RENAULT TRUCKS DELIVER.
31. RENAULT TRUCKS. (2017). Todo sobre el intercooler.
32. Ríos Molestina, E. F., & Rivera Criollo, C. L. (2017). Análisis mecánico del desgaste de las pastillas de freno en las motocicletas. Universidad Internacional del Ecuador, 9.
33. Robert Bosch España. (2019). Bosch automóvil. Obtenido de [http://es.bosch-automotive.com/es/internet/parts/parts\\_and\\_accessories/motor\\_and\\_systems/benzin/more\\_sensors/moresensors\\_sensors\\_electrics\\_parts\\_1.html#](http://es.bosch-automotive.com/es/internet/parts/parts_and_accessories/motor_and_systems/benzin/more_sensors/moresensors_sensors_electrics_parts_1.html#).
34. Ruesta, G. (2016). Consideraciones del factor humano en el sistema vial para la reducción de accidentes de tránsito y su severidad. Piura: Universidad de Piura. doi:[https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2568/ICI\\_223.pdf?sequence=1](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2568/ICI_223.pdf?sequence=1).
35. Sánchez Calderón, C. S., & Rivadeneira Delgado, M. R. (2018). Desarrollo e implementación física de un sistema de seguridad por cámaras IP en el colegio Dr. Eduardo Granja Garces. Guayaquil: Instituto Superior Tecnológico Guayaquil.
36. Sardar, S., Santanu , K. K., & Debdulal , D. (2018). High stress abrasive wear characteristics of Al 7075 alloy and 7075/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite. *Measurement*, 2.
37. SENPLADES. (2017). Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021. Toda una vida. Quito: SENPLADES.

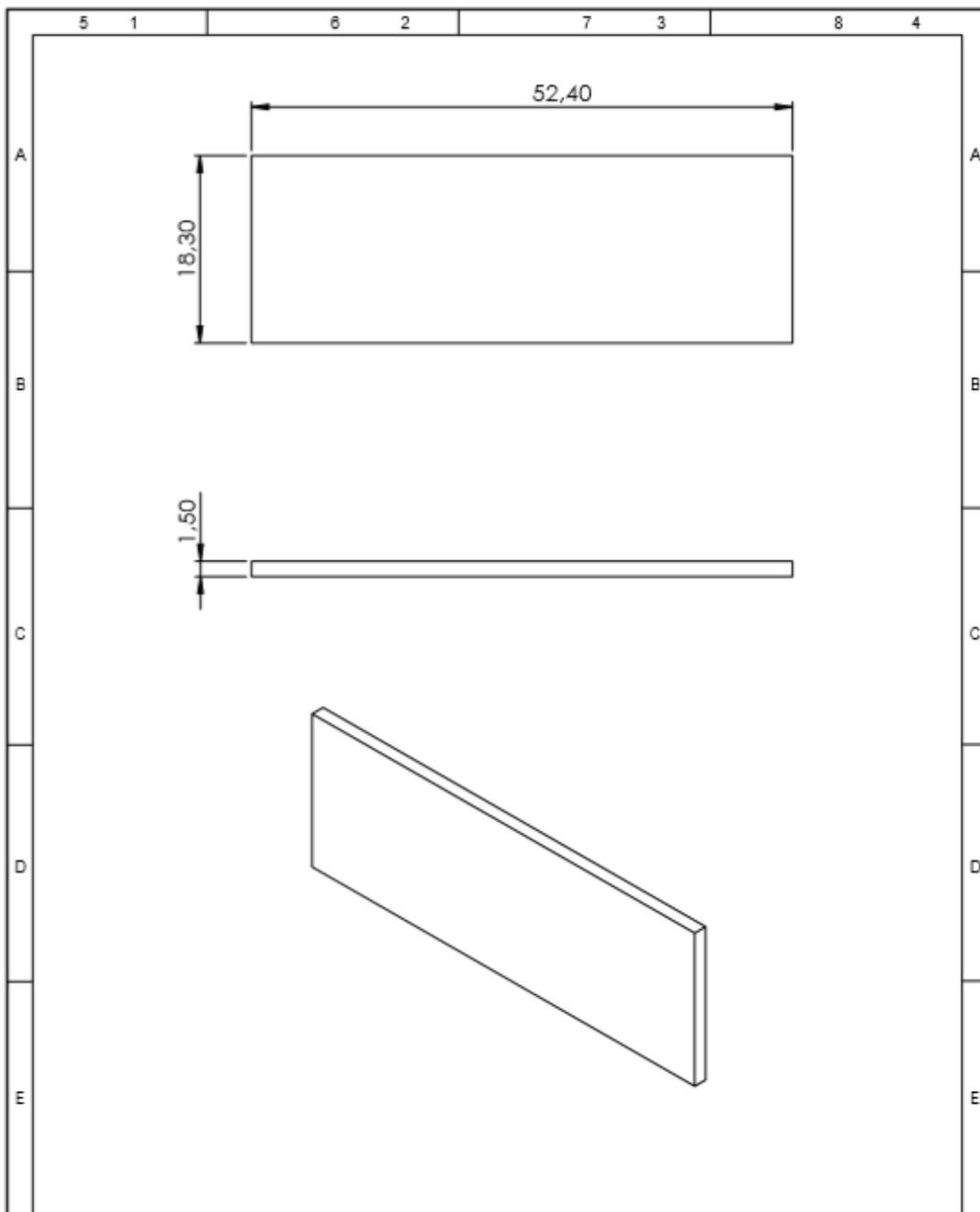
38. Shanker, P. S. (2018). A review on properties of conventional and metal matrix composite materials in manufacturing of disc brake . ELSELVIER, 5864–5869 .
39. Shi, S. (2016). Automobile brake system. Finlandia: Savonia University of applied sciences.
40. Tablero, N. (02 de 12 de 2014). MISTER BLOG AUTO. Obtenido de MISTER BLOG AUTO: <http://blog.mister-auto.es/coches/como-verificar-el-desgaste-de-los-discos-de-freno/>
41. URIBE, S. (2018). Diseño y fabricación de una máquina para ensayo de desgaste abrasivo según lineamientos de la norma ASTM G-65. Bogotá: Universidad Santo Tomás Facultad de Ingeniería Mecánica.
42. Velasteguí Carrillo, A. J. (2015). Los materiales de fricción y su influencia en la eficiencia de frenado. Quito: Quito: USFQ, 2015.
43. 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. UIDE.

## **ANEXOS**



## ANEXO II

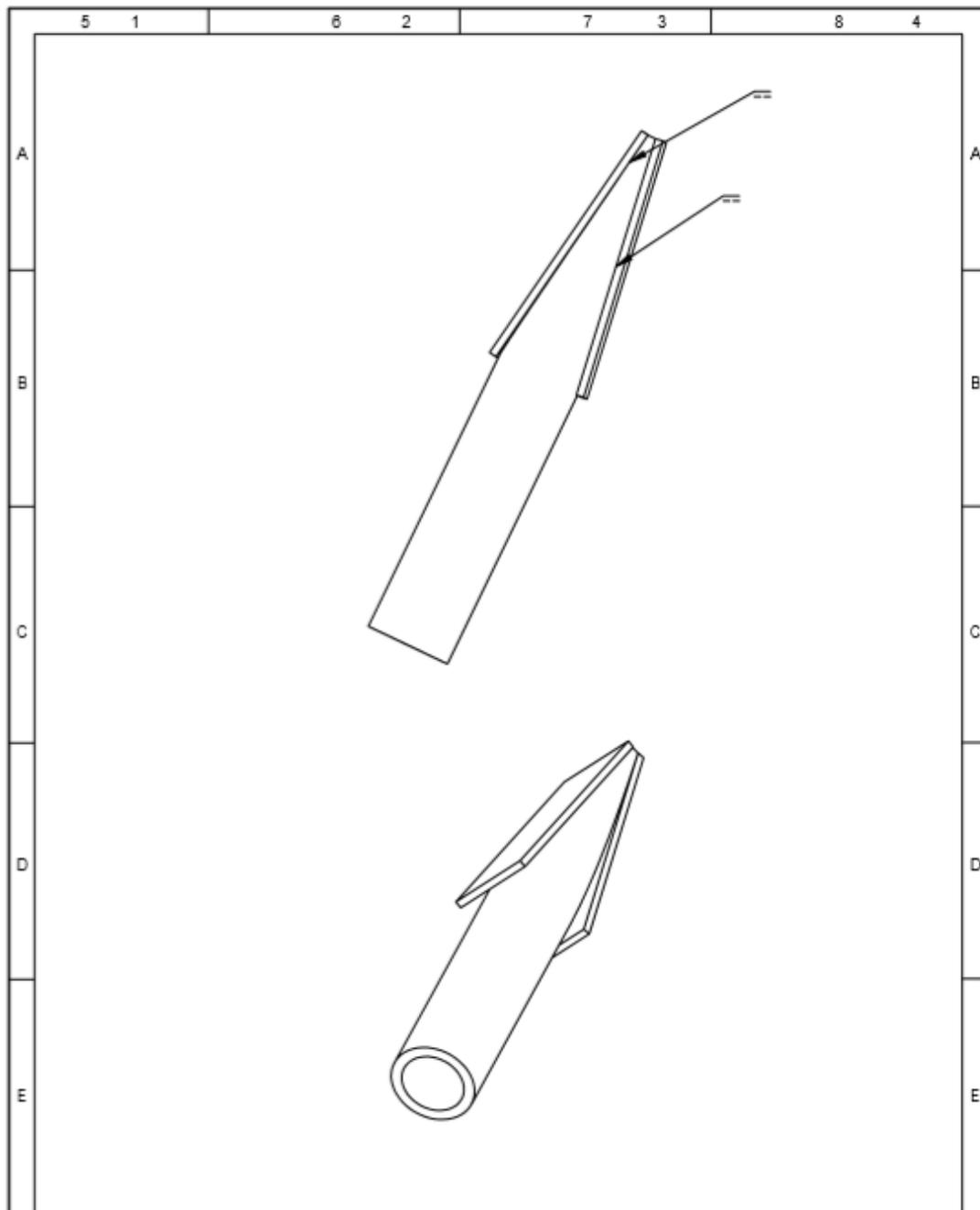
### PLANO DEL ELEMENTO 2 DE LA BOQUILLA



					Tolerancia ±0.05	Peso -	Materiales: <b>ACERO INOXIDABLE</b>		
					Fecha	Nombre	Denominación: <b>ELEMENTO 2 DE LA BOQUILLA</b>		Escala: 2:1
				Dib.	17/10/2020	Javier Serna Ingeniero Civil			
				Rev.	17/10/2020	Ing. Carlos Sagorín Uña			
					Apro.	17/10/2020	Ing. Carlos Sagorín Uña		
				<b>U.T.N</b>			Número del dibujo: 2		
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	INGENIERIA AUTOMOTRIZ			Sustitución		

### ANEXO III

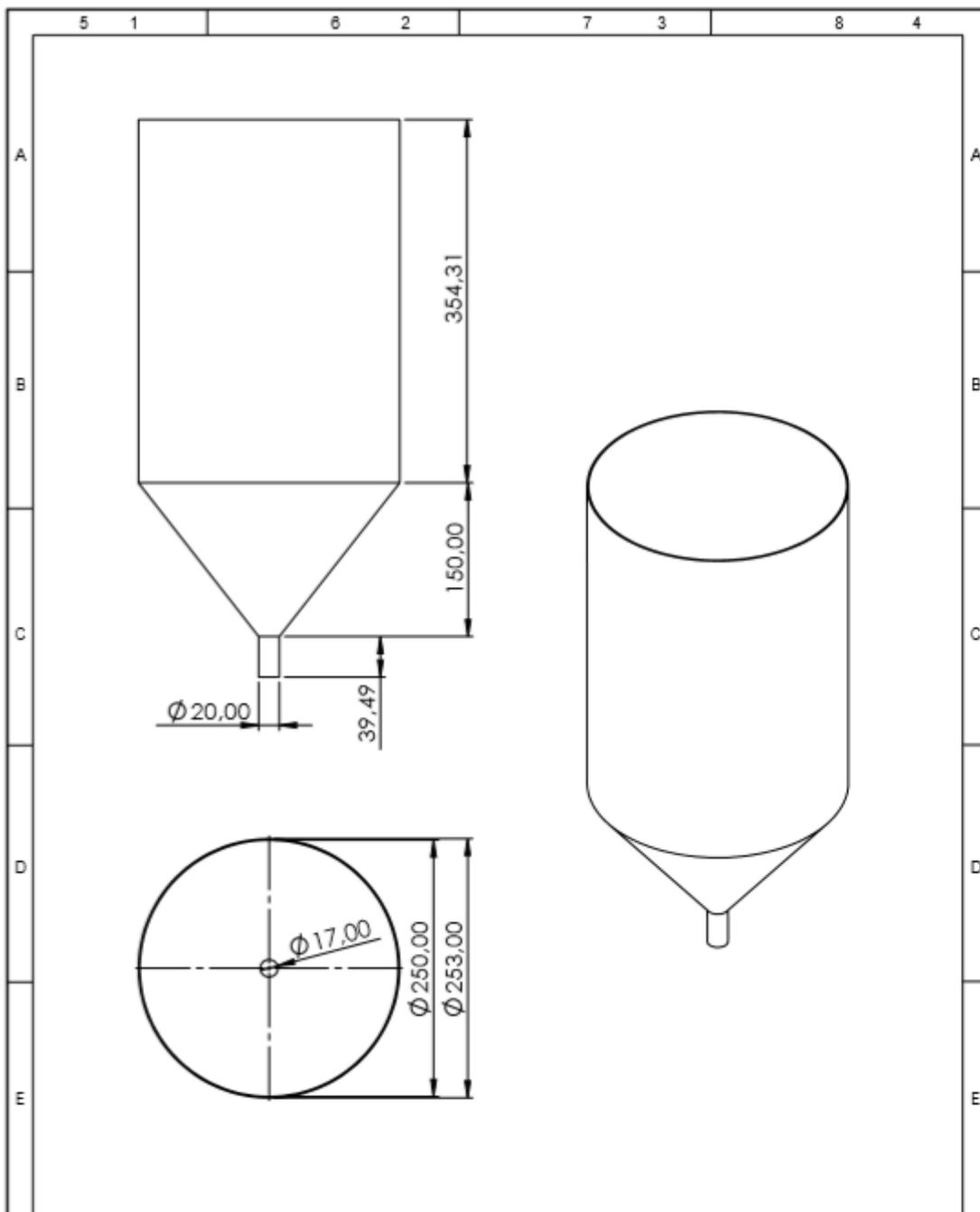
## PLANO DEL ENSAMBLAJE DE LA BOQUILLA



				Tolerancia ±0.05	Peso -	Materiales: ACERO INOXIDABLE	
				Fecha	Nombre	Denominación: ENSAMBLAJE DE LA BOQUILLA	Escala: 1:1
				Dib. 17/1/2020	Josua Salazar Servicio Técnico		
				Rev. 17/1/2020	Ing. Carlos Segura 1016		
				Apro. 17/1/2020	Ing. Carlos Segura 1016		
				<b>U.T.N</b> INGENIERIA AUTOMOTRIZ		Número del dibujo: 3	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			Sustitución	

### ANEXO IV

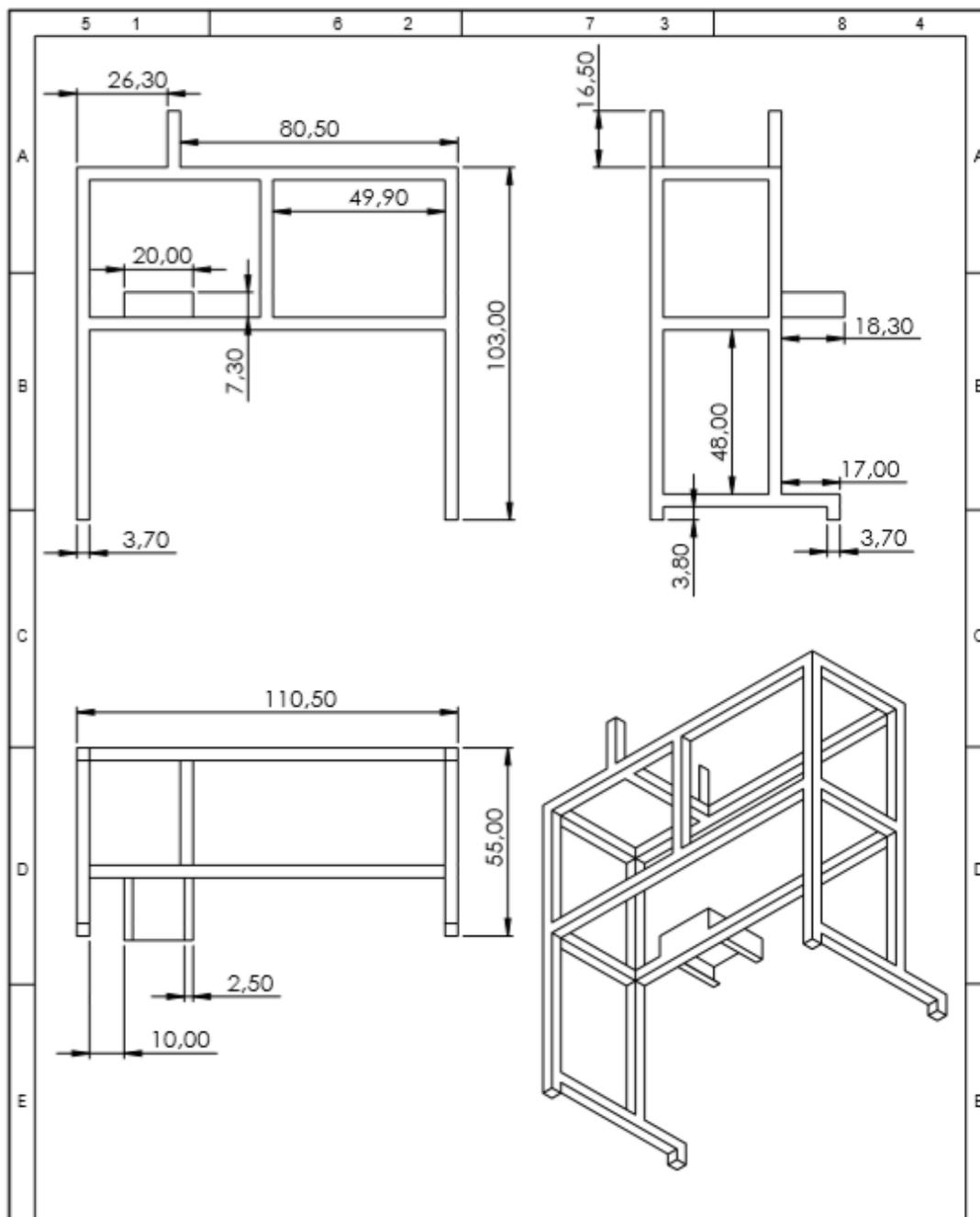
### PLANO DE LA TOLVA



		Tolerancia ±0.05		Peso -	Materiales: <b>ACERO INOXIDABLE</b>	
		Fecha	Nombre		Denominación: <b>TOLVA</b>	Escala: 1:5
		Dib.	17/1/2020			
		Rev.	17/1/2020			
		Apro.	17/1/2020			
<b>U.T.N</b> INGENIERIA AUTOMOTRIZ				Número del dibujo: 4		
				Sustitución		
Revisión	Modificación	Fecha	Nombre			

### ANEXO V

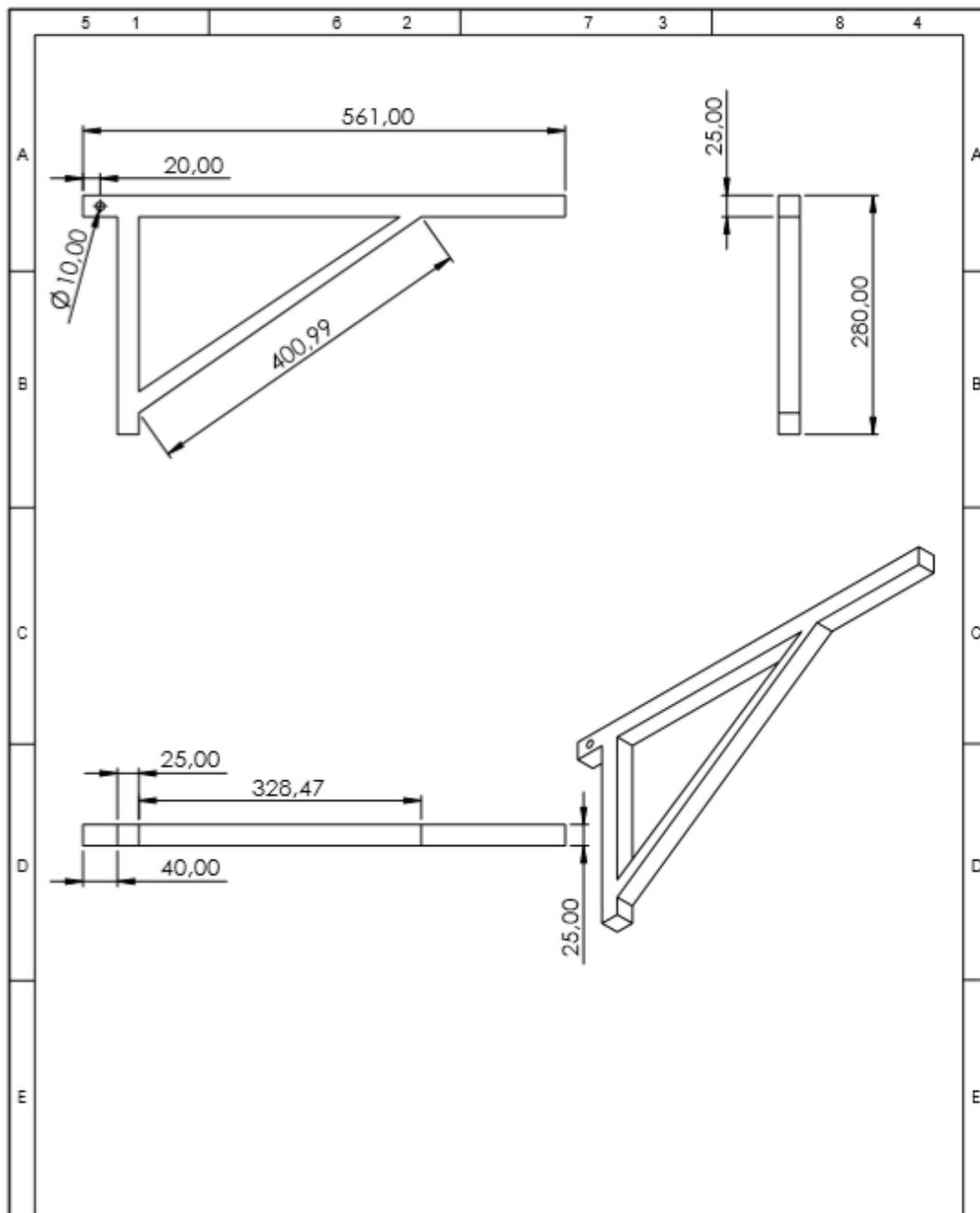
## PLANO DE LA ESTRUCTURA



		Tolerancia ±0.05	Peso -	Materiales: ASTM A36	
		Fecha	Nombre	Denominación: ESTRUCTURA	Escala: 1:1.5
		Dib. 17/1/2020	Liana Salas Liana Salas		
		Rev. 17/1/2020	Ing. Carlos Saguro Uta		
		Apro. 17/1/2020	Ing. Carlos Saguro Uta		
<b>U.T.N</b>				Número del dibujo:	5
INGENIERIA AUTOMOTRIZ				Sustitución	⊕ - ⊖
Revisión	Modificación	Fecha	Nombre		

## ANEXO VI

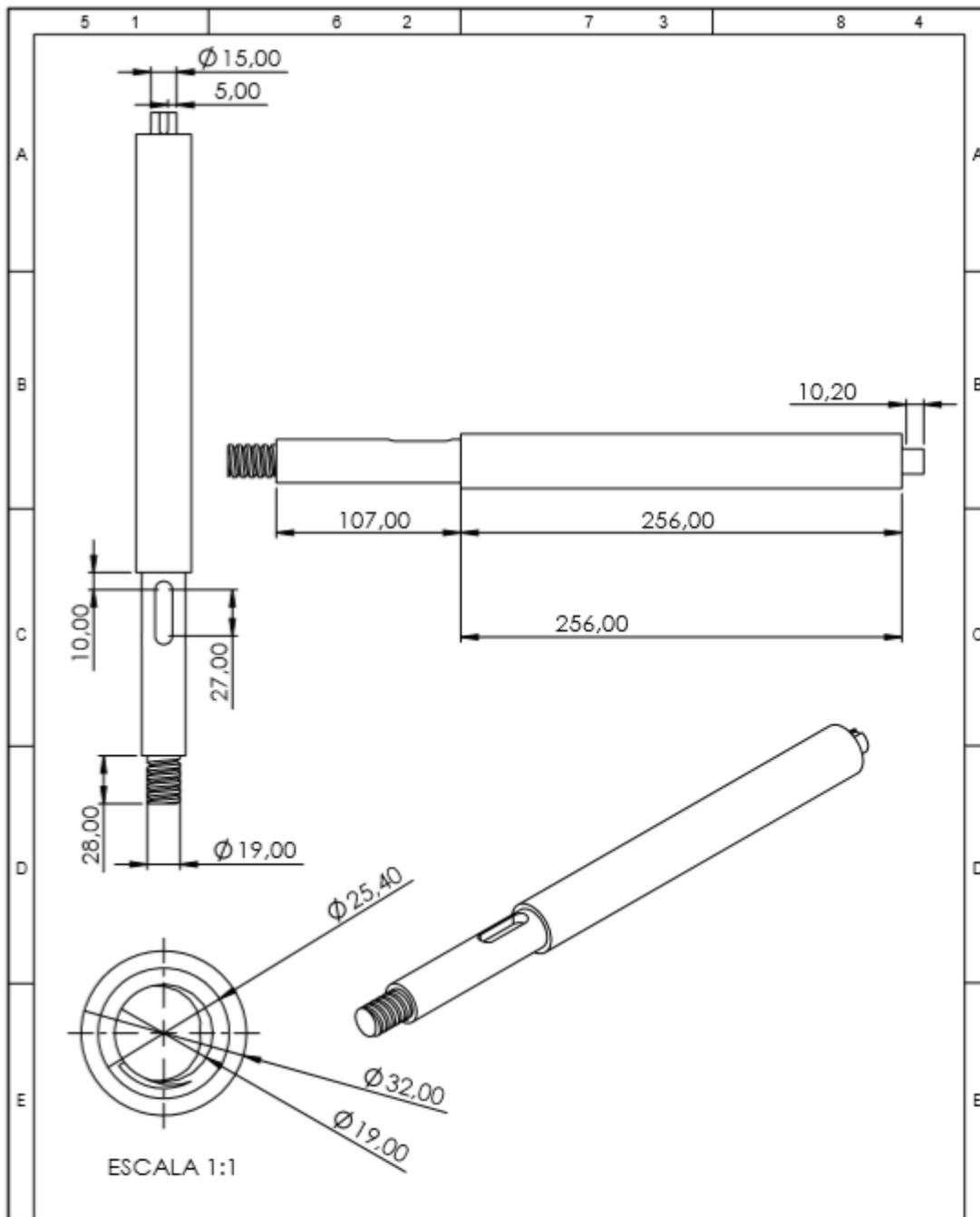
### PLANO DEL BRAZO



				Tolerancia ±0.05	Peso -	Materiales: <b>ASTM A36</b>		
						Denominación: <b>BRAZO</b>	Escala: 1:6	
				Dib.	Fecha			Nombre
				Rev.	17/1/2020			Ing. Carlos Roberto Ulla
				Apro.	17/1/2020	Ing. Carlos Roberto Ulla		
				<b>U.T.N</b>		Número del dibujo:	6	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	INGENIERIA AUTOMOTRIZ		Sustitución		

## ANEXO VII

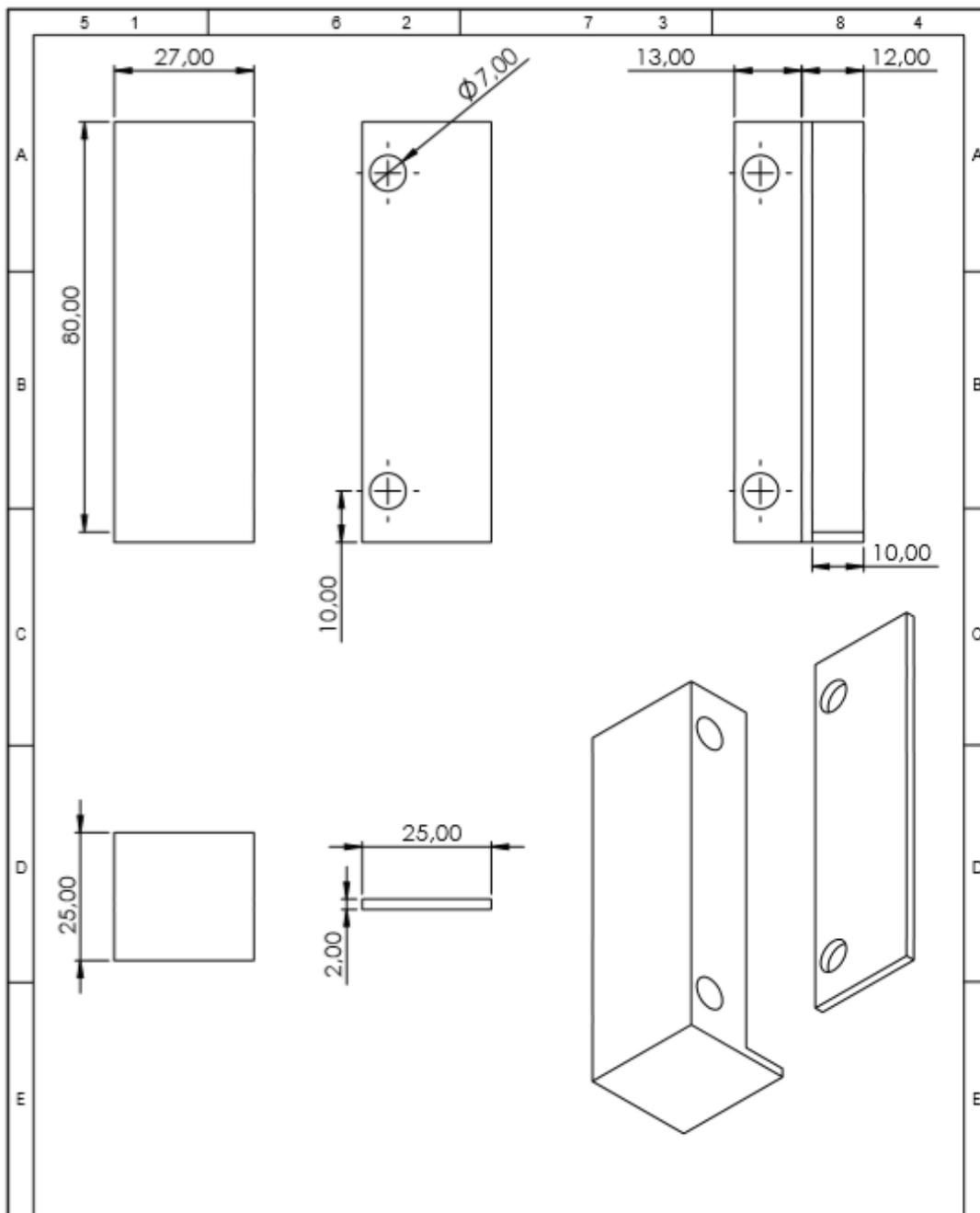
### PLANO DEL EJE



				Tolerancia $\pm 0,05$	Peso -	Materiales: <b>ACERO DE TRANSMISIÓN</b>			
				Fecha	Nombre	Denominación: <b>EJE</b>	Escala: 1:3		
				Dib. 17/1/2020	Carlos Suarez Luisa Lopez				
				Rev. 17/1/2020	Ing. Carlos Suarez Liza				
				Apr. 17/1/2020	Ing. Carlos Suarez Liza				
				<b>U.T.N</b> INGENIERIA AUTOMOTRIZ		Número del dibujo: 7			
Relación	Modificación	Fecha	Nombre			Sustitución			

### ANEXO VIII

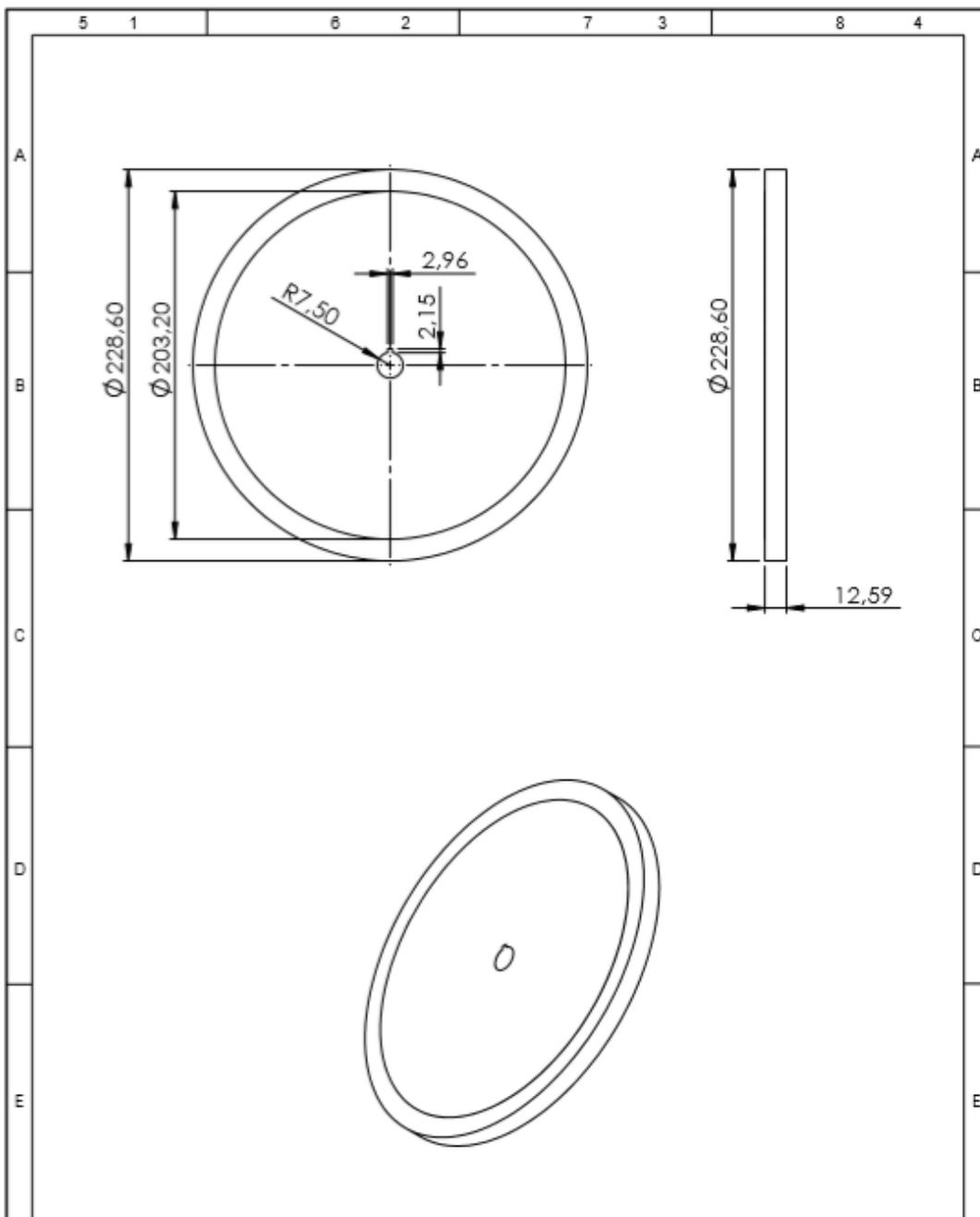
### PLANO DEL PORTA PROBETA



				Tolerancia ±0.05	Peso -	Materiales: ASTM A36	
				Fecha 17/1/2020	Nombre Cecilia Espino Lorena Urbina	Denominación: PORTA PROBETA	
				Rev. 17/1/2020	Ing. Cecilia Espino UTE		Escala: 1:1
				Apro. 17/1/2020	Ing. Cecilia Espino UTE		
				<b>U.T.N</b> INGENIERIA AUTOMOTRIZ		Número del dibujo: 8	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			Sustitución	

### ANEXO IX

### PLANO DEL DISCO RECUBIERTO DE CAUCHO



				Tolerancia ±0.05	Peso -	Materiales: ACERO AISI 1018 RECUBIERTO DE NITRILO	
				Dib.	Fecha	Nombre	Denominación:
				Rev.	17/1/2020	Ing. Carlos Segura Ulla	DISCO RECUBIERTO DE CAUCHO
				Apro.	17/1/2020	Ing. Carlos Segura Ulla	Escala: 1:3
				<b>U.T.N</b>		Número del dibujo:	9
				INGENIERIA AUTOMOTRIZ		Sustitución	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				

## ANEXO X

### PROGRAMACIÓN ARDUINO

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Wire.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2);

volatile int contador=0;
int rpm=0;
int t1=0;
int t2=0;

void setup() {
  Serial.begin(57600);
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.clear();
  lcd.setCursor (2,0);
  lcd.print("UTN 2019");
  attachInterrupt(0,interrupcion0,RISING);
  rpm=0;
}

void loop() {
  delay(1000);
  rpm=60000/((t2-t1));
  Serial.print(rpm);
  Serial.print(" \r\n");
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(4,0);
  lcd.print("VELOCIDAD");
```

```
lcd.setCursor(3,1);  
lcd.print(rpm);  
lcd.print(" RPM");  
contador=0;  
}
```

```
void interrupcion0()  
{  
contador++;  
t1=t2;  
t2=millis();  
}
```

**ANEXO XI**  
**MEMORIA TÉCNICA**



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL  
NORTE**

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

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

**TEMA: "ANÁLISIS DEL DESGASTE POR ABRASIÓN DEL MATERIAL DE LAS  
PASTILLAS DE FRENO DE VEHÍCULOS LIVIANOS DISPONIBLES EN EL  
MERCADO LOCAL MEDIANTE ENSAYOS BASADOS EN LA NORMA  
TÉCNICA ASTM G-65 PARA DETERMINAR SU NIVEL DE DESGASTE."**

**AUTORES: DAYANA SALOME ALVAREZ MEJIA  
PABLO ANDRES NARVAEZ SIMBAÑA**

**DIRECTOR: ING. CARLOS SEGOVIA Msc.**

**Ibarra, 2019**

## **INTRODUCCIÓN**

El sistema de frenos es uno de los principales sistemas de seguridad activa del vehículo y según la agencia pública de noticias del Ecuador y Sur América es el causante en conjunto con los daños mecánicos del 1% de los accidentes de tránsito.

La eficiencia de frenado depende principalmente del material y las propiedades de la almohadilla de la pastilla de freno teniendo en cuenta que es el componente sometido a fricción con el disco. El desconocimiento de la relación entre la aplicación del vehículo y el tipo de almohadilla de freno utilizada influye significativamente en el desempeño y duración de los componentes de este sistema.

Para dar solución a esta problemática se analiza el desgaste abrasivo de las pastillas de freno de asbesto, carbón, metálicas y cerámicas en una máquina construida según la norma técnica ASTM G-65 que establece ensayos de abrasión para diferentes tipos de materiales. Esta máquina permite determinar la resistencia de un material a la abrasión que se produce ante un disco recubierto por caucho de clorobutilo y un flujo laminar de arena de Ottawa.

El desgaste producido en las probetas se lo analiza en pérdida de volumen debido a la diferencia entre la densidad de los materiales obteniendo desgastes diferentes en cada material ensayado. Además, los resultados tienen un respaldo estadístico de pruebas de hipótesis realizadas con una muestra de 20 probetas por material.

Finalmente se realiza una comparativa de resistencia al desgaste con la finalidad de redactar una memoria técnica donde se correlacione los resultados obtenidos en los ensayos de acuerdo al desgaste de cada material con la aplicación de los vehículos ya sea de uso personal o de trabajo.

## **PROBLEMÁTICA**

La cultura de nuestra sociedad al momento de adquirir algún producto se caracteriza por tener como referente principal su precio y no sus propiedades o especificaciones que ayudan a establecer sus parámetros de uso. En el caso de las pastillas de freno se tiene cuatro tipos que se expenden en el mercado local los cuales son asbesto, carbón, metálicas y cerámicas que disponen de ciertas características, propiedades, ventajas y desventajas; Sin embargo, el desconocimiento de los materiales y su resistencia al desgaste por abrasión de las pastillas de freno en los vehículos es muy notable en los propietarios, conductores, distribuidores y técnicos de vehículos porque al momento de realizar la compra de las pastillas de freno no

tienen en cuenta sus propiedades mecánicas frente al desgaste por abrasión existente en la acción de frenado.

### **OBJETIVO GENERAL**

Analizar el desgaste por abrasión del material de las pastillas de freno de vehículos livianos disponibles en el mercado local mediante ensayos basados en la norma técnica ASTM G-65 para determinar su nivel de desgaste.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar una investigación bibliográfica en documentos relacionados con el desgaste abrasivo de materiales según norma técnica ASTM G-65 con la finalidad de reunir información concisa y veraz que aporten a la investigación.
- Diseñar y construir una máquina para ensayos de desgaste abrasivo tomando en cuenta los parámetros de diseño y construcción de la norma técnica ASTM G-65 que permita realizar ensayos de abrasión a las almohadillas de freno.
- Realizar ensayos de desgaste por abrasión en pastillas de freno de automóviles disponibles en el mercado local siguiendo los parámetros de ensayo establecidos por la norma técnica ASTM G-65 con la finalidad de obtener resultados reales para su posterior análisis e interpretación.
- Elaborar una memoria técnica con los datos más relevantes de la investigación a través de un análisis y síntesis de la información que permita entender de manera clara la resistencia al desgaste abrasivo de las pastillas de freno.

### **METODOLOGÍA**

Este trabajo cumple con una metodología teórico- práctica porque consta del diseño mecánico y construcción de la máquina que permite realizar los ensayos de abrasión cumpliendo un orden específico de las actividades realizadas para la obtención de los resultados en las probetas de ensayo para su posterior análisis.

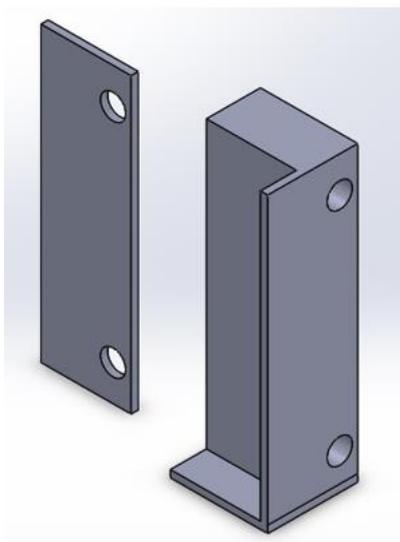
#### **Diseño del brazo y porta-probetas**

En el diseño del brazo se realizó un diagrama de cuerpo libre con la finalidad de encontrar el peso a aplicarse para obtener en el porta-probetas una fuerza de 130 N resultándonos un peso de 51,95 N. El material a usado es un tubo cuadrado de pulgada un cuarto ( $1\frac{1}{4}$ ) con 2 mm de espesor; especificaciones tomadas de la Norma ASTM G-65.



**Figura 1.** Vista 3D del brazo de palanca

El porta-probeta se acopla a las dimensiones que especifica la normativa para las probetas teniendo un largo de 76 mm, ancho de 25 mm y un espesor que puede variar de 3mm a 12,7 mm.

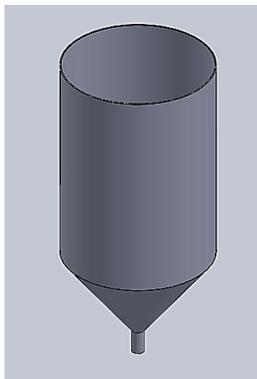


**Figura 2.** Vista 3D de la porta probetas

### **Tolva**

En el diseño de la tolva se tomó como referencia principal el tiempo máximo que establece la normativa ASTM G-65 de 30 minutos diseñándola para un volumen que abastezca un flujo de arena continuo durante este tiempo.

Con datos específicos de flujo de arena de 400 g/min y una densidad de  $0,64 \text{ gr/cm}^3$  se obtuvo que la capacidad idónea de la tova es de 18,75 L, sin embargo, se la diseñó para una capacidad de 20 L.

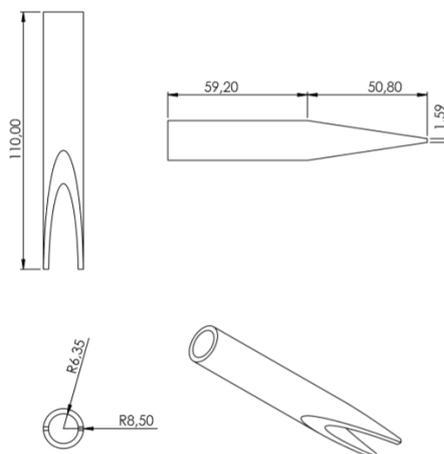


**Figura 3** Tolva diseñada en SolidWorks

### Boquilla

La boquilla tiene como propósito principal distribuir la arena con un flujo laminar de 300 gr/min a 400 gr/min; durante los ensayos debe estar colocada lo más próxima a la probeta y el disco cubierto con caucho.

Para su construcción tomó el acero inoxidable debido a que es fácilmente soldable y posee buena resistencia a la corrosión, de la misma manera también se puede utilizar cobre y acero.

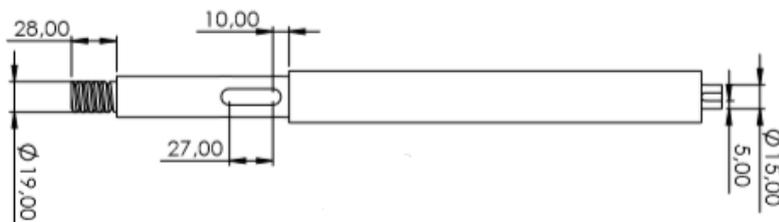


**Figura 4.** Dimensiones para la fabricación de la boquilla

### Eje De Transmisión

Para el diseño del eje se utilizó el acero de transmisión AISI 1018 que en nuestro país es el equivalente del acero AISI 1020 que indica la normativa además de ser el más comercial en el medio.

El eje está estructurado de acuerdo a las necesidades de acoplamiento, sin embargo, se tomó como referencia el diámetro mínimo calculado de 5,90 mm y se sobredimensionó a 15 mm para poder introducir un perno de 7 mm y una chaveta de  $\frac{1}{4}$  que sujeta el disco.

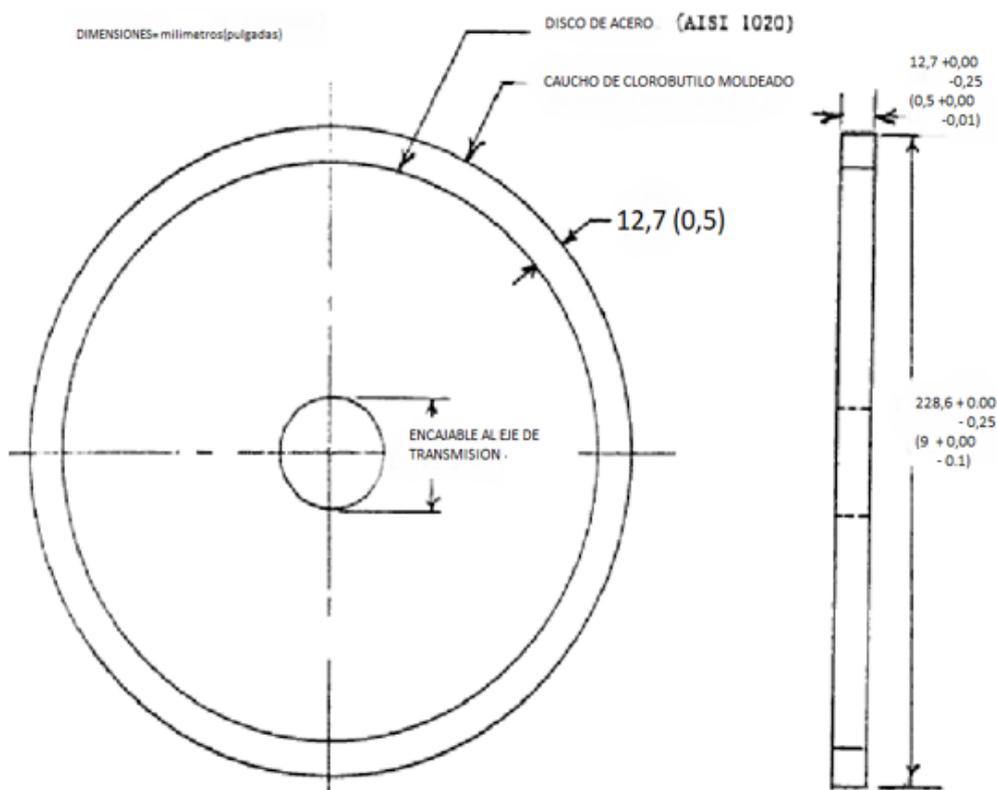


**Figura 5.** Vista frontal del eje de transmisión

### Disco

Para el diseño del disco se consideró dos elementos, el disco y el recubrimiento del caucho el cual debe ser vulcanizado y poseer una dureza Shore A-60; las dimensiones y materiales del disco se toman directamente de la norma ASTM G-65, donde se tiene:

- Diámetro del disco de acero de 8" (203,2 mm) y un espesor de 0,5" (12,7 mm).
- Recubrimiento de caucho sintético de clorobutilo (CIIR) con dimensiones de 0,5" (12,7 mm) de ancho y espesor.



**Figura 6.** Caucho de acero recubierto de caucho de goma

Por el problema de adquisición del caucho de clorobutilo se utilizó el caucho de nitrilo NBR 60 que es un material accesible en el país y sus propiedades se acercan considerablemente a las del CIIR como lo podemos observar en la tabla.

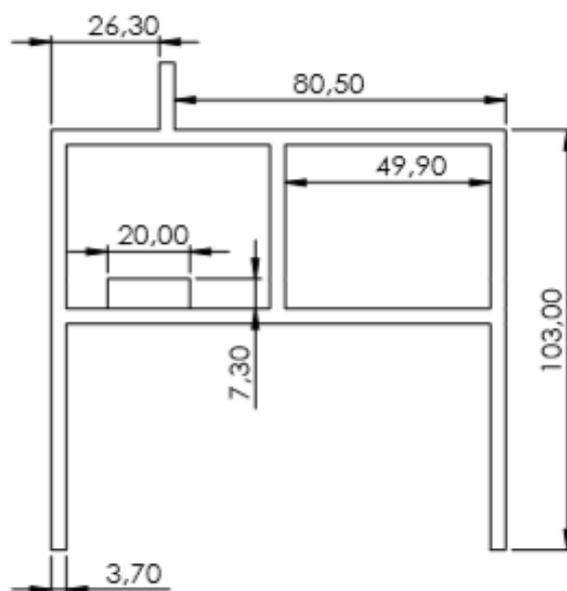
**Tabla 1.** Propiedades mecánicas de los cauchos CIIR y NBR 60

Nombre comercial	Componente activo	Dureza	Temperatura de servicio	Resistencia a la tracción	Alargamiento de rotura
		Shore A	°C	Mpa	%
CIIR	Clorobutilo	60	120	18	620
NBR 60	Acrilonitrilo Butadieno	60± 2	100	14	580

**Fuente:** (URIBE, 2018)

### Estructura

Para la estructura se utilizó tubo cuadrado de 38.1 x 38.1 x 1.5 mm que se consideró suficiente para poder soportar tanto las cargas como los elementos que conforman la máquina. De la misma manera este tipo de material es fácilmente soldable y tiene buenas propiedades de resistencia lo cual es indispensable para mantener una estructura firme para su correcto funcionamiento.



**Figura 7.** Estructura de la máquina de desgaste abrasivo vista frontal

### **Elementos Eléctricos**

Como elementos eléctricos se utilizó un motor trifásico de 1 HP que es especificado por la normativa ASTM G-65 y un variador de frecuencia que se utilizó para graduar las revoluciones del disco a exactamente 200rpm.

### **Elementos Electrónicos**

Como elementos electrónicos se utilizó una placa Arduino y una pantalla LCD que fueron programados con la finalidad de mostrar las revoluciones que se aprecia en el variador de frecuencia en HERTZ en Rpm para mayor exactitud y comodidad al momento de realizar las pruebas de ensayo.

### **Probetas**

Las probetas deben tener ciertas dimensiones establecidas por la normativa y estar completamente libres de impurezas en su superficie con la finalidad de evitar inconvenientes en los resultados obtenidos.

Las probetas deben cumplir las siguientes dimensiones:

**Ancho:** 25 mm

**Largo:** 76mm

**Espesor:** 3mm a 12,7 mm

## **RESULTADOS**

Los resultados obtenidos tras la culminación de este trabajo de investigación se obtuvieron de la realización del procedimiento B que especifica la normativa para materiales de alta, media y baja resistencia a la abrasión con un tiempo de prueba de 10 min.

### **Validación de la máquina**

La validación de los elementos de la máquina son los primeros resultados obtenidos luego de realizar algunas pruebas preliminares para corroborar su correcto funcionamiento obteniendo:

**Tabla 2.** Pruebas de comprobación del flujo de arena

Prueba	Tiempo (min)	Valor real (gr)	Valor nominal (gr)	Resultado
1	1	328	300-400	Correcto
2	1	334	300-400	Correcto
3	1	351	300-400	Correcto
4	1	319	300-400	Correcto

**Tabla 3.** Pruebas realizadas al disco recubierto

	Valor real	Resultado
Disco	8 pulgadas	correcto
Recubrimiento de caucho	0.5 pulgadas	correcto

**Tabla 4.** Comprobación de las RPM del motor

Prueba	Tiempo	Valor nominal	Valor real	Tolerancia	Resultado
1	1 min	200 rpm	200 rpm	$\pm 10$	Correcto
2	1 min	200 rpm	200 rpm	$\pm 10$	Correcto
3	1 min	200 rpm	199 rpm	$\pm 10$	Correcto
4	1 min	200 rpm	199 rpm	$\pm 10$	Correcto
5	1 min	200 rpm	201 rpm	$\pm 10$	Correcto
6	1 min	200 rpm	200rpm	$\pm 10$	Correcto
7	1 min	200 rpm	198 rpm	$\pm 10$	Correcto
8	1 min	200 rpm	200 rpm	$\pm 10$	Correcto

**Validación de las probetas**

Luego de la validación de la máquina se comprobó las dimensiones de las probetas con la finalidad de verificar si cumplen con lo establecido en la normativa tal como se muestra en la tabla:

**Tabla 5.** Dimensiones de las probetas

PASTILLA	LARGO	ANCHO	ESPESOR
Metálica	7.5 cm	2.5 cm	0.9 cm
Asbesto	7.5 cm	2.5 cm	1.1 cm
Carbón	7.5 cm	2.5 cm	1.3 cm
Cerámica	7.5 cm	2.5 cm	0.8 cm

### Ensayos de abrasión

Para poder realizar los ensayos se debe seguir el siguiente procedimiento:

10. Limpiar las probetas con solvente retirando cualquier suciedad o partícula extraña, posterior a esto se dejó secar la probeta para eliminar estos residuos.
11. Pesar cada una de las probetas utilizando una balanza analítica con una exactitud de 0.001 gr.
12. Con el brazo de la máquina levantado se procede a colocar la probeta; colocar el peso adecuado en el extremo del brazo para que se ejerza la presión entre la probeta y el disco y el brazo debe bajarse solo cuando haya iniciado el flujo de arena y empiece a girar el disco recubierto de caucho.
13. Programar el variador de frecuencia en los 66.66 Hertz y encender el motor reductor.
14. Esperar que el disco gire a las revoluciones deseadas comprobando el valor de 200 RPM en la pantalla LCD.
15. Abrir la llave que controla el paso de arena de Ottawa y observar que esta tenga un flujo constante y laminar.
16. Después de esto se bajar el brazo de la máquina con cuidado permitiendo de esta forma que la probeta entre en contacto con el disco y la arena abrasiva.
17. Una vez finalizada la prueba levantar el brazo de la máquina y retirar la probeta, detener el paso de arena y apagar el motor reductor.
18. Volver a pesar la probeta, y se observar el desgaste provocado por la arena abrasiva registrando los resultados obtenidos.

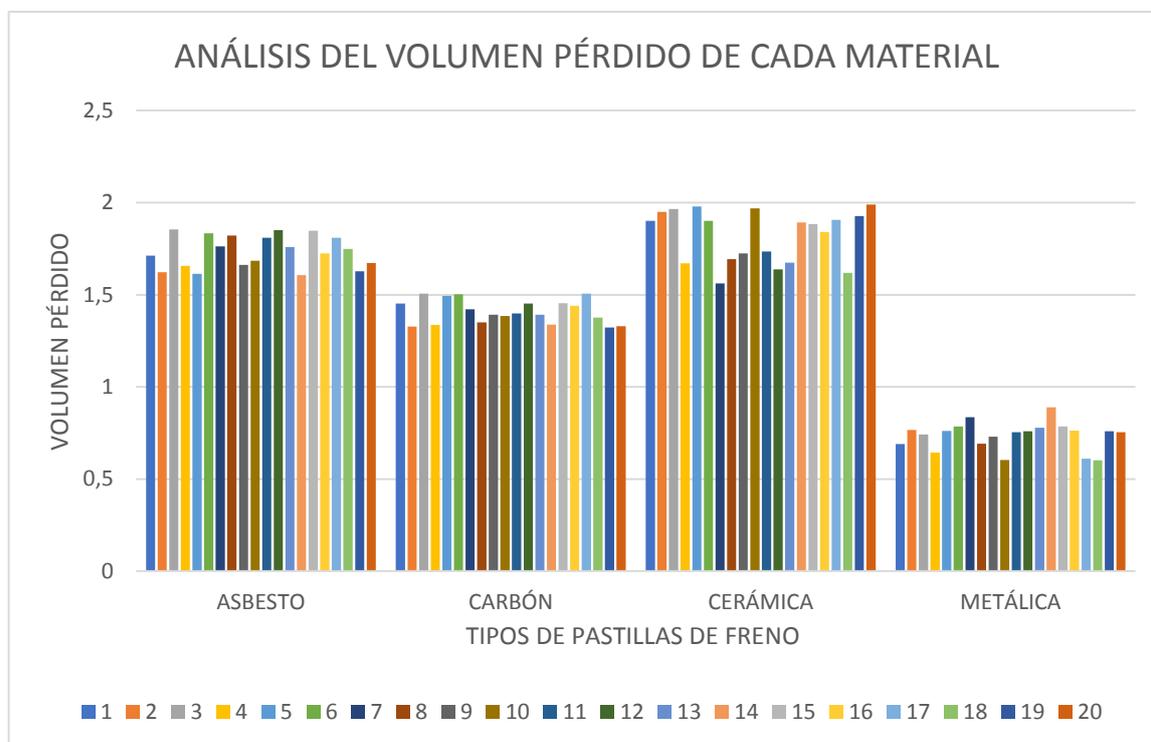
### Resultados Obtenidos

Las pastillas de freno sometidas a los ensayos de abrasión arrojaron los datos representados en la tabla:

**Tabla 6.** Resultados expresados en pérdida de masa y de volumen

N. PROBETA	ASBESTO (cm <sup>3</sup> )	CARBÓN (cm <sup>3</sup> )	CERÁMICA (cm <sup>3</sup> )	METÁLICA (cm <sup>3</sup> )
1	1,713	1,453	1,902	0,6900
2	1,622	1,327	1,949	0,7660
3	1,855	1,507	1,965	0,7418
4	1,657	1,337	1,670	0,6442
5	1,613	1,494	1,979	0,7605
6	1,833	1,502	1,901	0,7858
7	1,763	1,422	1,561	0,8361
8	1,821	1,351	1,693	0,6906
9	1,668	1,392	1,725	0,7299
10	1,685	1,384	1,969	0,6037
11	1,810	1,399	1,735	0,7542
12	1,851	1,452	1,637	0,7602
13	1,759	1,392	1,675	0,7775
14	1,606	1,338	1,892	0,8902
15	1,848	1,454	1,884	0,7847
16	1,725	1,440	1,840	0,7627
17	1,809	1,507	1,907	0,6104
18	1,749	1,377	1,618	0,6006
19	1,627	1,322	1,928	0,7596
20	1,672	1,329	1,990	0,7541

Con los valores obtenidos de pérdida de volumen de cada tipo de pastilla de freno se pudo realizar el siguiente grafico para poder apreciar de mejor manera el desgaste sufrido por cada material.



**Figura 8.** Análisis en barras del volumen perdido de cada material expresado en  $\text{cm}^3$

Para poder representar el desgaste en porcentaje se realizó el promedio de masa inicial, masa final, masa pérdida y el volumen perdido como se indica en la tabla 4.16, para ello fue necesario calcular el volumen promedio inicial y el volumen promedio final de cada probeta.

**Tabla 7.** Promedio de volumen perdido de las diferentes pastillas de freno

PASTILLAS	PROMEDIO VOLUMEN INICIAL	PROMEDIO VOLUMEN FINAL	PROMEDIO VOLUMEN PÉRDIDO
Asbesto	$20,625 \text{ cm}^3$	$18,916 \text{ cm}^3$	$1,709 \text{ cm}^3$
Carbón	$24,385 \text{ cm}^3$	$22,976 \text{ cm}^3$	$1,409 \text{ cm}^3$
Cerámicas	17,529	15,679	1,85
Metálicas	16,875	16,177	0,70

Con esto se procede a calcular los porcentajes de desgaste para una mejor comprensión a los resultados obtenidos de los ensayos.

Asbesto:

$$\% \text{ desgaste asbesto} = \frac{20.625 - 18.916}{20.625} * 100$$

$$\% \text{ desgaste asbesto} = 8.28 \%$$

Carbón:

$$\% \text{ desgaste carbón} = \frac{24.385 - 22.976}{24.385} * 100$$

$$\% \text{ desgaste carbón} = 5.78\%$$

Cerámicas:

$$\% \text{ desgaste cerámicas} = \frac{17.529 - 15.679}{17.529} * 100$$

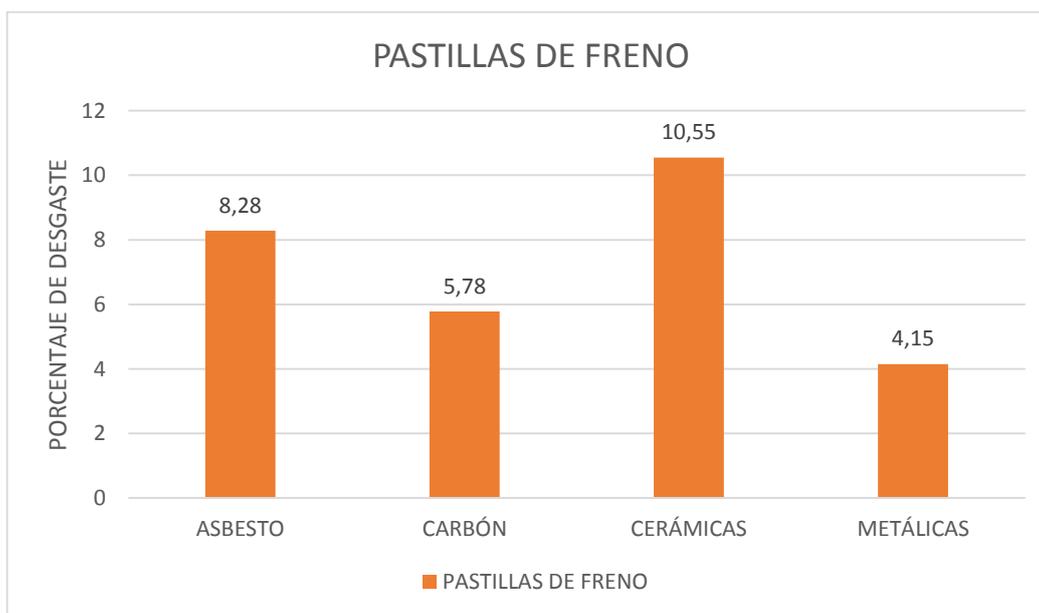
$$\% \text{ desgaste cerámicas} = 10,553 \%$$

Metálicas:

$$\% \text{ desgaste metálicas} = \frac{16.875 - 16.177}{16.875} * 100$$

$$\% \text{ desgaste metálicas} = 4.148 \%$$

Finalmente, se comparó los porcentajes de pérdida de masa en cuadros de barra para poder apreciarlos de mejor manera:



**Figura 9.** Porcentaje de desgaste de cada tipo de pastilla de freno

## CONCLUSIONES

- La norma técnica ASTM G 65 establece parámetros que permite realizar ensayos de abrasión a diferentes materiales mediante la elaboración de una máquina tribológica; esta norma establece la metodología a seguir en los ensayos abrasivos y dicta cinco procedimientos a elegir según la resistencia a la abrasión que posee cada material; para las pastillas de freno se determinó que el procedimiento idóneo es el B.
- El diseño y construcción de la máquina de ensayos de desgaste abrasivo de acuerdo a lo establecido por la norma técnica ASTM G65 fue realizada en referencia a los principales componentes como son el motor trifásico de 1 hp acoplado a una caja reductora de 10 a 1, variador de frecuencia, tolva, arena de otawwa, disco recubierto de caucho shore 60, brazo y porta probeta; su diseño fue realizado en el programa SolidWorks y los materiales de construcción fueron elegidos de acuerdo a los parámetros de la norma.
- Con los ensayos realizados a los tipos de pastillas de freno se puede afirmar que las pastillas metálicas son más resistentes a la abrasión teniendo un 4,14% de desgaste mientras que las pastillas de freno de cerámica y de carbón presentan un 10,55% y 5,78% respectivamente; por esta razón son más recomendables para vehículos que están sometidos a largos períodos de trabajo; las pastillas de carbón disponen de una resistencia a la abrasión intermedia y pueden ser utilizadas en vehículos de uso personal o de servicio teniendo presente también el inconveniente del desprendimiento de material de color oscuro que se adhiere a los elementos aledaños al sistema de frenos.
- Las pastillas de freno cerámicas a pesar de su rendimiento superior con respecto a las demás disponen de una resistencia a la abrasión inferior por lo que su mantenimiento es más prematuro y por esta razón se las utiliza en vehículos para competición o vehículos condicionados a mantenimientos más continuos.
- Al realizar la validación de hipótesis por medio del programa estadístico Statgraphics, se pudo comprobar que el volumen desgastado para las pastillas de asbesto es de  $1,725 \text{ cm}^3$ , para las de carbón  $1,399 \text{ cm}^3$ , para las pastillas metálicas  $0,7541 \text{ cm}^3$  y para la cerámica  $1,884 \text{ cm}^3$ , además de verificar que el desgaste producido en todas las probetas de un mismo material sea simétrico.

## RECOMENDACIONES

- En el diseño y construcción de la máquina se recomienda investigar posibles materiales alternos disponibles en el mercado local con características similares a los determinados por la norma técnica ASTM G-65 debido a que ciertos materiales no se distribuyen en el país y para ser importados debe ser en cantidades grandes tornándose costosa su adquisición.
- Con la finalidad de obtener probetas homogéneas durante su preparación se recomienda utilizar máquinas herramientas y verificar sus dimensiones, esto evitará una diferencia relevante en los datos tomados en el pesaje de las probetas.
- La máquina de ensayos de desgaste, al cumplir con la norma ASTM G-65 se puede utilizar en el futuro para ensayos en otros materiales.
- Complementar el análisis de desgaste por abrasión en pastillas de freno mediante el estudio de eficiencias de frenado de acuerdo al material del que se compone cada una de ellas.

**ANEXO XII****MÁQUINA CONSTRUIDA SEGÚN NORMA ASTM G-65**