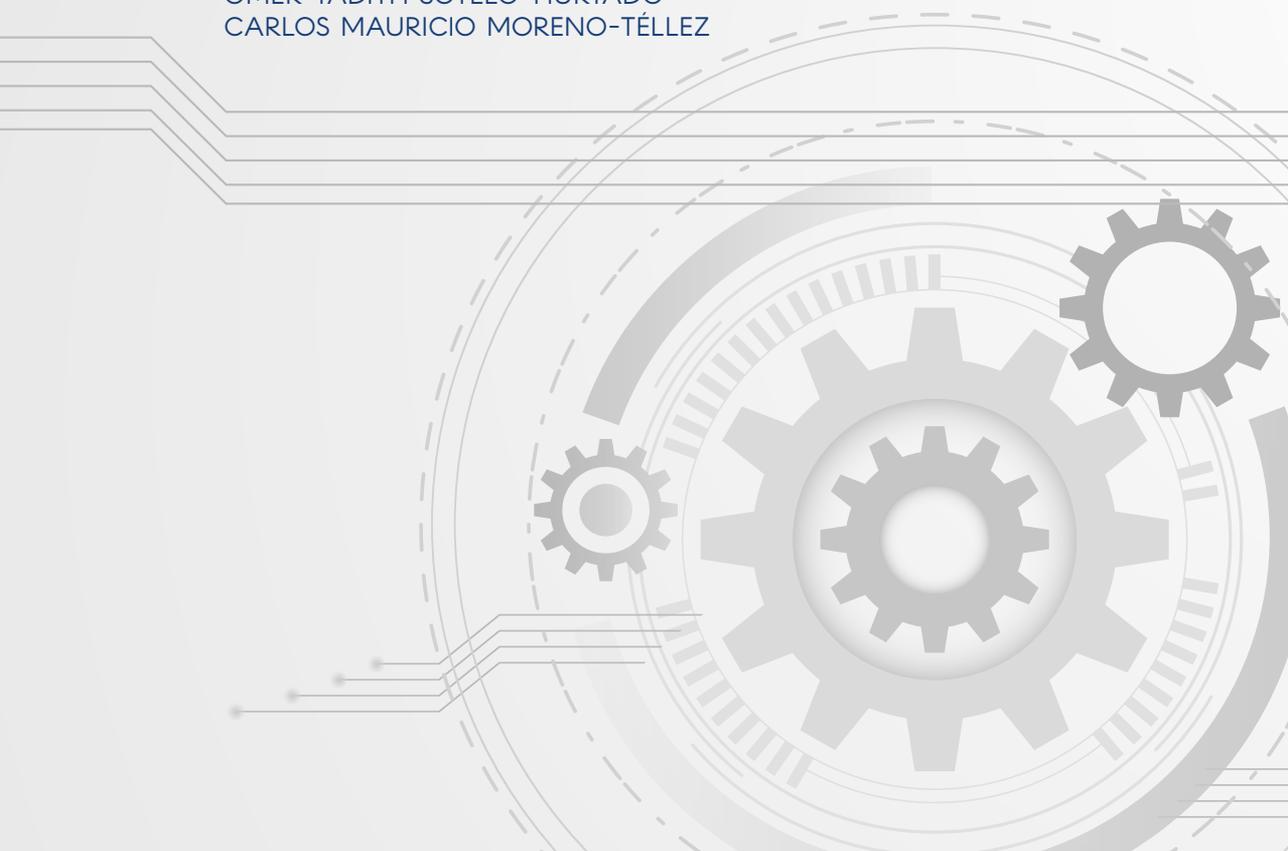


IMPLEMENTACIÓN DE UN  
TRIBÓMETRO AUTOMATIZADO  
RUEDA DE CAUCHO ARENA SECA /  
ARENA HÚMEDA PARA LA  
EVALUACIÓN DEL DESGASTE  
ABRASIVO EN MATERIALES

---

ALFONSO RODRÍGUEZ-PEÑA  
OSCAR FABIÁN HIGUERA-COBOS  
ROBIN JOSTIN PICO-MONTES  
OMER YADITH SOTELO-HURTADO  
CARLOS MAURICIO MORENO-TÉLLEZ





**IMPLEMENTACIÓN DE UN TRIBÓMETRO AUTOMATIZADO  
RUEDA DE CAUCHO ARENA SECA / ARENA HÚMEDA PARA LA  
EVALUACIÓN DEL DESGASTE ABRASIVO EN MATERIALES**

ALFONSO RODRÍGUEZ-PEÑA  
OSCAR FABIÁN HIGUERA-COBOS  
ROBIN JOSTIN PICO-MONTES  
OMER YADITH SOTELO-HURTADO  
CARLOS MAURICIO MORENO-TÉLLEZ

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
2023



Implementación de un tribómetro automatizado rueda de caucho arena seca / arena húmeda para la evaluación del desgaste abrasivo en materiales / Implementation of an automated dry sand/wet sand rubber wheel tribometer for the evaluation of abrasive wear in materials / Rodríguez-Peña, Alfonso; Higuera-Cobos, Oscar Fabián; Pico-Montes, Robin Jostin; Sotelo-Hurtado, Omer Yadith; Moreno-Téllez, Carlos Mauricio. Tunja: Editorial UPTC, 2023. 156 p.

ISBN (impreso) 978-958-660-761-2

ISBN (ePub) 978-958-660-762-9

Incluye referencias bibliográficas

1. Resistencia a la abrasión por vía húmeda. 2. Resistencia a la abrasión por vía seca. 3. Tribología. 4. Norma ASTM G65. 5. Norma ASTM G105. 6. Rediseño.

(Dewey 620.1 /21) (Thema TGMT - Ensayo de materiales)



**Uptc**<sup>®</sup>

Universidad Pedagógica y  
Tecnológica de Colombia



Primera Edición, 2023

100 ejemplares (impresos)

Implementación de un tribómetro automatizado  
rueda de caucho arena seca/arena húmeda para la  
evaluación del desgaste abrasivo en materiales  
Implementation of an automated dry sand/wet  
sand rubber wheel tribometer for the evaluation of  
abrasive wear in materials

ISBN (impreso) 978-958-660-761-2

ISBN (ePub) 978-958-660-762-9

Colección Investigación UPTC N.º 273

Proceso de arbitraje doble ciego

Recepción: octubre 2022

Aprobación: febrero de 2023

© Alfonso Rodríguez-Peña, 2023

© Oscar Fabián Higuera-Cobos, 2023

© Robin Jostin Pico-Montes, 2023

© Omer Yadith Sotelo-Hurtado, 2023

© Carlos Mauricio Moreno-Téllez, 2023

© Universidad Pedagógica y Tecnológica de  
Colombia, 2023

Editorial UPTC

Edificio Administrativo – Piso 4

La Colina, Bloque 7, Casa 5

Avenida Central del Norte 39-115, Tunja, Boyacá

comite.editorial@uptc.edu.co

www.uptc.edu.co

**Rector, UPTC**

Enrique Vera López

**Comité Editorial**

Dr. Carlos Mauricio Moreno Téllez

Dr. Jorge Andrés Sarmiento Rojas

Dra. Yolima Bolívar Suárez

Mg. Pilar Jovanna Holguín Tovar

Dra. Nelsy Rocío González Gutiérrez

Dra. Ruth Maribel Forero Castro

Dr. Óscar Pulido Cortés

Mg. Edgar Nelson López López

**Editor en Jefe**

Ph. D. Witton Becerra Mayorga

**Coordinadora Editorial**

Mg. Andrea María Numpaque Acosta

**Corrección de Estilo**

Mg. Andrea María Numpaque Acosta

**Diseño Portada e Impresión**

**Editorial JOTAMAR S.A.S.**

Calle 57 No. 3 - 39.

Tunja - Boyacá - Colombia.



Libro financiado en cooperación entre la Vicerrectoría de Investigación y Extensión - Dirección de Investigaciones de la UPTC y la Vicerrectoría de Investigaciones, Extensión y Proyección Social de la Universidad del Atlántico. Se permite la reproducción parcial o total, con la autorización expresa de los titulares del derecho de autor. Este libro es registrado en Depósito Legal, según lo establecido en la Ley 44 de 1993, el Decreto 460 de 16 de marzo de 1995, el Decreto 2150 de 1995 y el Decreto 358 de 2000.

Impreso y hecho en Colombia - Printed and made in Colombia

Los Grupos de Investigación que participaron en esta investigación fueron: CONFORMAT-PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA-FACULTAD DE INGENIERÍA-UNIVERSIDAD DEL ATLÁNTICO Y GRUPO DE INTEGRIDAD Y EVALUACIÓN DE MATERIALES (GIEM)-ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA DE LA UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA-UPTC

Citar este libro / Cite this book

Rodríguez-Peña, A. Higuera-Cobos, O. Pico-Montes, R. Sotelo-Hurtado, O. Moreno-Téllez, C. (2023). *Implementación de un tribómetro automatizado rueda de caucho arena seca/arena húmeda para la evaluación del desgaste abrasivo en materiales*. Editorial UPTC.

doi: doi: <https://doi.org/10.19053/9789586607612>

## RESUMEN

---

Este trabajo abarca el rediseño realizado a la máquina para la evaluación de la resistencia a la abrasión por vía seca regida por la norma ASTM G65, perteneciente a la Universidad del Atlántico; esta máquina se modificó para implementar la evaluación de la resistencia a la abrasión por vía húmeda, según los lineamientos establecidos por la norma ASTM G105, asimismo, se convirtió en un equipo automatizado por medio de un PLC. La metodología empleada, consistió, en primera instancia, en la realización de pruebas experimentales al equipo antiguo (Norma ASTM G65), con las cuales se detectaron fallas en su diseño y se identificaron las mejoras necesarias para la implementación de la norma ASTM G105, se determinaron los elementos principales para instalar el control del proceso de forma automatizada. Luego, se realizó un diseño conceptual que permitió seleccionar la mejor opción para la fabricación de la estructura, posteriormente, se realizaron simulaciones en el software SolidWorks, con el fin de verificar los elementos críticos de la máquina, sus cargas permisibles, validar las deformaciones, y conocer el factor de seguridad. Del mismo modo, se hicieron los cálculos para determinar el tamaño y forma adecuada de las tolvas y del contenedor de la prueba para resistencia por abrasión húmeda. De esta manera, se seleccionaron los elementos necesarios para la construcción del equipo, aunque algunos de estos elementos fueron diseñados con una variedad de formas y tamaños, los cuales no se encontraron en el mercado, por ende, fue necesaria su fabricación mediante diferentes procesos de manufactura. Al mismo tiempo, se realizó un estudio para la selección de los elementos de control y su puesta a punto, mediante ensayos basados en las normas ASTM G65 y ASTM G105. La máquina desarrollada permite realizar pruebas automatizadas para la evaluación de la abrasión por vía seca y húmeda.

**Palabras clave:** Resistencia a la abrasión por vía húmeda; Resistencia a la abrasión por vía seca; Tribología; Norma ASTM G65; Norma ASTM G105; Rediseño.

# ABSTRACT

---

This work covers the redesign of the machine for the evaluation of dry abrasion resistance according to the ASTM G65 standard, from the Universidad del Atlántico; this machine was modified to implement the evaluation of wet abrasion resistance, according to the guidelines established by the ASTM G105 standard, and it was also converted into an automated equipment by means of a PLC. The methodology employed consisted in the first instance in conducting experimental tests to the old equipment (ASTM G65 standard), with which design flaws were detected and the necessary improvements for the implementation of ASTM G105 were identified, and the main elements to install the automated process control were also determined. Then a conceptual design was carried out to select the best option for the manufacture of the structure, based on that, simulations were performed in the SolidWorks software, in order to verify the critical elements of the machine, its permissible loads, validate the deformations, and know the safety factor; then calculations were made to determine the size and shape of the hoppers and the container for the wet abrasion resistance test. In this way, the necessary elements for the construction of the equipment were selected, although some of these elements were designed with a variety of shapes and sizes, which were not found in the market, therefore, it was necessary to manufacture them through different manufacturing processes. In addition, a study was carried out for the selection of the control elements and their fine-tuning, through tests based on ASTM G65 and ASTM G105 standards. The machine developed allows automated tests for the evaluation of dry and wet abrasion.

**Keywords:** Wet abrasion resistance; dry abrasion resistance; tribology; ASTM G65 Standard; ASTM G105 Standard; redesign.

## AUTORES

---



**ALFONSO  
RODRÍGUEZ-PEÑA**

---

Ingeniero Mecánico de la Universidad Tecnológica de Bolívar, M.Sc. en Ingeniería Mecánica de la Universidad del Norte. Especialista en Gerencia de Producción y Operaciones de Universidad Autónoma del Caribe. Especialista en Gestión Eficiente de Energía de la Universidad del Atlántico. Especialización Técnica en Fabricación de Productos Metalmecánicos con máquinas CNC del SENA. Especialización Técnica en Sistemas Hidráulicos del SENA. Docente Universitario desde 1998 de la Universidad Autónoma del Caribe, Universidad Libre, Politécnico Costa Atlántica. Desde 2015, se desempeña como Docente de Tiempo Completo en la Universidad del Atlántico. Director del Semillero de Diseño y Simulación del Grupo de Investigación CONFORMAT del Programa de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Atlántico. Es autor de la Patente de Invención Nacional Separador quirúrgico autoestático para cirugía de reemplazo total de cadera. Su área de investigación está relacionada con el diseño, simulación y construcción de productos comerciales, mecánicos y médicos.

<https://orcid.org/0000-0002-2928-6044>

E-mail: [alfonsorodriguez1@mail.uniatlantico.edu.co](mailto:alfonsorodriguez1@mail.uniatlantico.edu.co)



## OSCAR FABIÁN HIGUERA-COBOS

---

Ingeniero Metalúrgico y M.Sc. en Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander-UIS. Ph. D. en Ciencia e Ingeniería de los Materiales de la Universidad Politécnica de Cataluña, España. Del 2001 al 2004, trabajó como profesor en la UIS. Fue profesor de planta en la Universidad Tecnológica de Pereira (2005-2015). Actualmente, es Investigador Senior (IS), profesor Titular y director del Grupo de Investigación CONFORMAT adscrito al programa de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Atlántico. Autor de 5 libros relacionados con las áreas de materiales y tribología, y cuenta con artículos relacionados con la Ingeniería Metalúrgica y la Ciencia de los Materiales. Sus áreas de investigación están relacionadas con la deformación plástica severa, la electroquímica y el medio ambiente, la metalurgia física, los tratamientos térmicos y los materiales avanzados.

<https://orcid.org/0000-0002-4836-5215>

E-mail: [oscarhiguera@mail.uniatlantico.edu.co](mailto:oscarhiguera@mail.uniatlantico.edu.co)



**ROBIN JOSTIN  
PICO-MONTES**

---

Robin Jostin Pico-Montes, nació en Barranquilla, Atlántico, Colombia, en 1989. Egresado de la Universidad del Atlántico, en donde obtuvo el título de Ingeniero Mecánico en el año 2022. Desde el año 2020, se ha desempeñado como coordinador de proyectos en el sector de la industria metalmecánica.

<https://orcid.org/0009-0007-8397-4175>

E-mail: [rpico@mail.uniatlantico.edu.co](mailto:rpico@mail.uniatlantico.edu.co)



**OMER YADITH  
SOTELO-HURTADO**

---

Egresado del SENA con un tecnólogo en diseño de elementos mecánicos con máquinas y herramientas CNC en el año 2019. Egresado de la Universidad del Atlántico, en donde obtuvo el título de Ingeniero Mecánico en el año 2022. Actualmente, trabaja de manera independiente por pedidos de empresas realizando proyectos de diseño, asistido por computadora mediante el software SolidWorks.

<https://orcid.org/0009-0001-2838-5331>

E-mail: [osotelo@mail.uniatlantico.edu.co](mailto:osotelo@mail.uniatlantico.edu.co)



## CARLOS MAURICIO MORENO-TÉLLEZ

---

Ingeniero Metalúrgico y M.Sc. en Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander-UIS; Ph. D. en Ingeniería de los Materiales de la Universidad de Navarra - España. Director del Proyecto de Integridad - Ecopetrol llanos Orientales (2008 a 2010). Desde el 2010 hasta la fecha, docente Titular de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia - UPTC, sede Tunja. Investigador Principal del Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales - INCITEMA e Investigador Asociado del Grupo de Integridad y Evaluación de Materiales – GIEM. Es autor de un libro relacionado con las áreas de materiales y tribología, así como de diferentes artículos relacionados con la Ingeniería Metalúrgica y la Ciencia de los Materiales. Las principales áreas de investigación del Dr. Moreno, están relacionadas con la modificación superficial de materiales, Integridad y corrosión de materiales, metalurgia física, tratamientos térmicos y materiales avanzados.

<https://orcid.org/0000-0002-2142-6145>

E. mail: carlosmauricio.moreno@uptc.edu.co

# CONTENIDO

---

Prefacio.....	17
<b>1. Marco Referencial.....</b>	<b>19</b>
1.1. Antecedentes.....	19
1.2. Marco Teórico.....	21
1.2.1. Tribología.....	21
1.2.2. Lubricación.....	22
1.2.3. Fricción.....	23
1.2.3.1. Fuerza de rozamiento estática.....	24
1.2.3.2. Fuerza de rozamiento cinemática.....	25
1.2.3.3. Fuerzas de rozamientos en el disco.....	26
1.2.4. Desgaste.....	28
1.2.4.1. Clasificación del desgaste.....	28
1.2.4.1.1. Desgaste abrasivo.....	29
1.2.4.1.2. Desgaste corrosivo.....	32
1.2.4.1.3. Desgaste por fatiga superficial.....	33
1.2.4.1.4. Desgaste por erosión.....	34
1.2.4.1.5. Desgaste adhesivo.....	34
1.2.4.2. Variables que afectan el proceso de desgaste.....	35
1.2.4.2.1. Efecto de la temperatura y la velocidad sobre el desgaste.....	36
1.2.4.2.2. Solubilidad.....	36
1.2.4.2.3. Estructura cristalina.....	37
1.2.5. Métodos para realizar ensayos de desgaste.....	37

1.2.5.1. Norma ASTM G65.....	38
1.2.5.2. Norma ASTM G105.....	40
<b>2. Metodología.....</b>	<b>41</b>
2.1. Rediseño del equipo.....	41
2.1.1. Caracterización del equipo.....	41
2.1.2. Pruebas experimentales preliminares.....	42
2.1.3. Realización de inventario de los elementos del equipo.....	44
2.1.4. Selección de los componentes para la automatización del equipo de desgaste abrasivo.....	44
2.1.5. Realización de un modelo cada del equipo.....	44
2.1.6. Simulaciones.....	44
2.1.7. Realización de los cálculos de diseño.....	46
2.1.8. Selección de materiales.....	46
2.2. Construcción del equipo.....	47
2.2.1. Desarme del equipo.....	47
2.2.2. Compra de materiales y equipos.....	47
2.2.3. Fabricación de los elementos del equipo mediante maquinado.....	47
2.2.4. Ensamble del equipo.....	48
2.3. Programación e implementación del ciclo de automatización del equipo.....	48
2.4. Verificación del funcionamiento del equipo.....	48
2.4.1. Preparación de probetas.....	48
2.4.2. Parámetros de prueba.....	49
2.4.3. Preparación de la máquina.....	49

2.4.4. Ajuste de programación.....	50
2.4.5. Ejecución de las pruebas experimentales.....	51
<b>3. Resultados y análisis.....</b>	<b>53</b>
3.1. Diseño conceptual.....	53
3.1.1. Componentes y materiales.....	54
3.1.1.1. Estructura.....	54
3.1.1.2. Discos de acero para el desgaste.....	56
3.1.1.2.1. Discos para la norma ASTM G65.....	56
3.1.1.2.2. Discos para la norma ASTM G105.....	57
3.1.1.3. Difusor de arena.....	57
3.1.1.4. Agente abrasivo.....	58
3.1.1.5. Porta probetas.....	60
3.2. Cálculos.....	61
3.2.1. Cálculo de la potencia requerida.....	61
3.2.2. Cálculo y diseño de la tolva de arena para la norma ASTM G65.....	64
3.2.3. Cálculo y diseño de la tolva de agua para la norma ASTM G105.....	66
3.2.4. Cálculos de la fuerza del cilindro neumático.....	67
3.3. Simulaciones de los componentes críticos.....	68
3.3.1. Simulación de la estructura.....	68
3.3.2. Simulación del eje.....	73
3.4. Selección de materiales y equipos.....	74
3.4.1. Motor.....	75

3.4.2. Pantalla HMI integrada con PLC.....	76
3.4.3. Variador de velocidad.....	76
3.4.4. Fuente de voltaje.....	77
3.4.5. Sensor de proximidad.....	77
3.4.6. Compresor.....	79
3.4.7. Actuador neumático y válvula.....	79
3.4.8. Cilindro neumático.....	80
3.4.9. Electroválvula.....	82
3.4.10. Unidad de mantenimiento/Filtro.....	82
3.4.11. Convertidor I/P.....	84
3.4.12. Celdas de carga.....	84
3.4.13. Transmisor de peso.....	85
3.4.14. Transmisor de voltaje a corriente.....	87
3.4.15. Ruedas.....	89
3.5. Construcción del equipo.....	89
3.5.1. Materiales y equipos para la construcción del tribómetro.....	89
3.5.2. Elaboración de elementos del equipo por procesos de manufactura.....	90
3.5.2.1. Estructura.....	91
3.5.2.2. Tolvas de arena y agua.....	93
3.5.2.3. Soporte de las tolvas.....	93
3.5.2.4. Puertas.....	93
3.5.2.5. Ventanas.....	93
3.5.2.6. Contenedor G-105.....	94

3.5.2.7. Placa de apoyo para el cilindro.....	94
3.5.2.8. Porta probetas.....	94
3.5.2.9. Eje.....	94
3.5.2.10. Discos de caucho.....	95
3.5.2.11. Boquilla dosificadora.....	95
3.5.3. Ensamble del equipo.....	95
3.5.4. Pintura del equipo.....	96
3.5.5. Instalación de elementos eléctricos.....	96
3.5.6. Instalación de elementos neumáticos.....	97
3.5.7. Costos de la construcción del equipo.....	97
3.6. Verificación del equipo.....	102
3.6.1. Pre-Operación de la máquina.....	102
3.6.1.1. Preparación de las probetas.....	102
3.6.1.2. Parámetros de prueba.....	102
3.6.2. Puesta en marcha del tribómetro.....	103
3.6.2.1. Montaje de los elementos para la norma ASTM G65.....	103
3.6.2.1.1. Montaje de la probeta y elección del procedimiento.....	104
3.6.2.1.2. Medición de flujo de arena.....	104
3.6.2.1.3. Calibración de la fuerza.....	105
3.6.2.1.4. Inicio de la prueba.....	106
3.6.2.1.5. Resultados.....	107
3.6.2.2. Montaje de las piezas para la norma ASTM G105.....	108
3.6.2.2.1. Montaje de la probeta y elección de los ensayos.....	109

3.6.2.2.2. Realización de la mezcla.....	109
3.6.2.2.3. Calibración de la fuerza.....	110
3.6.2.2.4. Inicio de la prueba.....	111
3.6.2.2.5. Resultados.....	113
<b>4. Conclusiones.....</b>	<b>115</b>
<b>5. Bibliografía.....</b>	<b>116</b>
<b>Anexo 1. Vista frontal de los elementos de la máquina.....</b>	<b>121</b>
<b>Anexo 2. Planos de los elementos del tribómetro.....</b>	<b>125</b>
<b>Anexo 3. Cálculos de la altura de la tolva de arena.....</b>	<b>142</b>
<b>Anexo 4. Cálculos de la altura de la tolva de agua.....</b>	<b>145</b>

# LISTA DE FIGURAS

---

<b>Figura 1.</b> Película de lubricante entre dos superficies.....	22
<b>Figura 2.</b> Fuerza de rozamiento estática.....	24
<b>Figura 3.</b> Fuerza de rozamiento cinética.....	25
<b>Figura 4.</b> Diagrama de fuerzas resultantes en un disco.....	26
<b>Figura 5.</b> Clasificación del desgaste.....	29
<b>Figura 6.</b> Ejemplo del desgaste abrasivo.....	30
<b>Figura 7.</b> (a) Representación de abrasión en dos cuerpos (b) Representación de abrasión en tres cuerpos.....	31
<b>Figura 8.</b> (a) Esquema de desgaste de bajo esfuerzo. (b) Esquema de abrasión de alto esfuerzo. (c) Esquema del desgaste por surcos. (d) Esquema de un pulido de un metal con una rueda de pulido.....	32
<b>Figura 9.</b> Ejemplo de desgaste corrosivo.....	33
<b>Figura 10.</b> (a) Desgaste por fatiga superficial en rodamiento (b) Ejemplo de desgaste por fatiga en engranaje.....	33
<b>Figura 11.</b> Ejemplo de desgaste por erosión.....	34
<b>Figura 12.</b> Daño causado por desgaste adhesivo al Acero AISI D1.....	35
<b>Figura 13.</b> (a) Ejemplo de desgaste por adhesión en engranaje (b) Ejemplo de desgaste por adhesión en rodamiento de rodillo cónico.....	35
<b>Figura 14.</b> Tribómetro rueda de caucho y arena seca según norma ASTM G65.....	41
<b>Figura 15.</b> (a) Tribómetro en funcionamiento. (b) Variador de velocidad y contador de vueltas de tribómetro. (c) Brazo y contrapeso del tribómetro rueda de caucho y arena seca. (d) Discos de caucho del tribómetro.....	42
<b>Figura 16.</b> Desarme del tribómetro rueda de caucho y arena seca.....	47

<b>Figura 17.</b> (a) Probeta de acero inoxidable martensítico AISI 403. (b) Probeta de aluminio. (c) Acero AISI 4140.....	49
<b>Figura 18.</b> (a) Montaje completo de los elementos G65. (b) Montaje completo de los elementos G105.....	50
<b>Figura 19.</b> (a) Pantalla de la norma G65. (b) Pantalla de la norma ASTM G105.....	51
<b>Figura 20.</b> Propuestas de diseño.....	55
<b>Figura 21.</b> Vistas de la estructura diseñada.....	56
<b>Figura 22.</b> (a) Plano del disco ASTM G65. (b) Diseño del disco ASTM G65. (c) Plano de disco ASTM G105. (d) Diseño del disco ASTM G105.....	57
<b>Figura 23.</b> (a) Ítem 1: diámetro y forma cónica de la tubería. (b) Ítem 2: platina y boquilla soldada. (c) Representación de la boquilla de arena.....	59
<b>Figura 24.</b> (a) Porta probeta G65. (b) Porta probeta G105.....	61
<b>Figura 25.</b> Esquema de fuerzas.....	62
<b>Figura 26.</b> (a) Dimensiones de la tolva. (b) Diseño final de la tolva de arena.....	65
<b>Figura 27.</b> Contenedor de la mezcla de la norma ASTM G105.....	66
<b>Figura 28.</b> (a) Dimensiones de la tolva. (b) Diseño final tolva de agua.....	67
<b>Figura 29.</b> Simulación de la estructura.....	69
<b>Figura 30.</b> Fuerzas resultantes.....	70
<b>Figura 31.</b> (a) Simulación del Mallado de la estructura. (b) Fuerzas resultantes en la estructura. (c) Desplazamientos resultantes en la estructura. (d) Deformación unitaria equivalente en la estructura. (e) Factor de seguridad en la estructura. (f) Estudio de pandeo en la estructura.....	73

<b>Figura 32.</b> Elementos del circuito eléctrico. (a) Motor trifásico. (b) Pantalla HMI integrada con PLC. (c) Variador de velocidad. (d) Fuente de voltaje. (e) Sensor de proximidad.....	78
<b>Figura 33.</b> Elementos neumáticos. (a) Compresor neumático. (b) Actuador neumático y válvula. (c) Cilindro neumático. (d) Electroválvula. (e) Unidad de mantenimiento. (f) Convertidor I/P.....	83
<b>Figura 34.</b> Celda de carga.....	85
<b>Figura 35.</b> Transmisor de celda de carga.....	86
<b>Figura 36.</b> Conexión de las celdas de carga y el transmisor de peso.....	87
<b>Figura 37.</b> Transmisor de corriente.....	87
<b>Figura 38.</b> Conexión electrónica completa.....	88
<b>Figura 39.</b> Ruedas del tribómetro.....	89
<b>Figura 40.</b> (a) Fabricación de la estructura metálica (b) Fabricación de las tolvas (c) Instalación de soportes en las tolvas (d) Instalación de puertas. (e) ventanas. (f) contenedor de mezcla. (g) Placa de apoyo para el cilindro neumático. (h) Porta probetas. (i) Eje conector. (j) Medición de dureza a disco. (k) Boquilla instalada en el equipo.....	92
<b>Figura 41.</b> Ensamble del equipo.....	95
<b>Figura 42.</b> Estructura en el proceso de aplicación de pintura.....	96
<b>Figura 43.</b> Conexión eléctrica del tribómetro.....	97
<b>Figura 44.</b> Instalación de los elementos neumáticos.....	98
<b>Figura 45.</b> Vista final del tribómetro automatizado.....	101
<b>Figura 46.</b> (a) Rueda de caucho de 228.6mm (b) Porta probetas para ASTM G65. (c) Montaje completo de los elementos.....	103
<b>Figura 47.</b> (a) Elección de procedimiento B. (b) Puesta de probeta.....	104
<b>Figura 48.</b> (a) Pantalla de flujo de arena. (b) Recolección del abrasivo.....	105

<b>Figura 49.</b> (a) Pantalla de calibración de la fuerza. (b) Probeta sobre el disco estático.....	105
<b>Figura 50.</b> Punto de calibración de la fuerza de 130 N.....	106
<b>Figura 51.</b> (a) Pantalla del proceso en ejecución. (b) Proceso de desgaste G-65.....	107
<b>Figura 52.</b> Elección de procedimiento E para el aluminio.....	107
<b>Figura 53.</b> (a) Acero inoxidable martensítico ASIS 403 (b) Aluminio.....	108
<b>Figura 54.</b> (a) Disco de caucho de 177.8 mm. (b) Portaprobetas ASTM G105. (c) contenedor de mezcla (d) Montaje completo.....	108
<b>Figura 55.</b> (a) Puesta de la probeta. (b) Elección del ensayo 1.....	109
<b>Figura 56.</b> (a) Pantalla de mezcla. (b) Mezcla en el contenedor.....	110
<b>Figura 57.</b> (a) Pantalla de calibración de la fuerza. (b) Probeta sobre el disco estático.....	110
<b>Figura 58.</b> Punto de calibración de la fuerza de 222 N.....	111
<b>Figura 59.</b> (a) Pantalla del ensayo 1 en ejecución. (b) Proceso de desgaste G105.....	112
<b>Figura 60.</b> (a) Pantalla del ensayo 3 en ejecución. (b) Disco shore A60. (c) Pantalla del ensayo 4 en ejecución. (d) Disco shore A70.....	112
<b>Figura 61.</b> Probeta de Acero 4140.....	113

# LISTA DE TABLAS

---

<b>Tabla 1.</b> Lista de pruebas para el estudio del desgaste .....	38
<b>Tabla 2.</b> Lista de procedimiento de la norma ASTM G65.....	39
<b>Tabla 3.</b> Lista de chequeo del tribómetro arena seca y rueda de caucho.....	44
<b>Tabla 4.</b> Lista de elementos del sistema de control.....	45
<b>Tabla 5.</b> Material, norma de desgaste y dimensiones de las probetas.....	48
<b>Tabla 6.</b> Parámetros de prueba.....	49
<b>Tabla 7.</b> Criterios para la selección de la estructura.....	54
<b>Tabla 8.</b> Agentes abrasivos por norma .....	59
<b>Tabla 9.</b> Tamaño de tamices necesarios para conseguir arena AFS 50/70 [4].....	60
<b>Tabla 10.</b> Propiedades del material de la estructura.....	69
<b>Tabla 11.</b> Fuerzas ejercidas sobre la estructura.....	70
<b>Tabla 12.</b> Propiedades del eje (AISI 4130).....	73
<b>Tabla 13.</b> Fuerzas ejercidas sobre el eje.....	74
<b>Tabla 14.</b> Características de motor trifásico .....	75
<b>Tabla 15.</b> Características de la pantalla HMI integrada con PLC.....	76
<b>Tabla 16.</b> Característica del variador de velocidad .....	77
<b>Tabla 17.</b> Características de la fuente de voltaje.....	77
<b>Tabla 18.</b> Características de sensor de proximidad.....	78
<b>Tabla 19.</b> Características del compresor neumático.....	79
<b>Tabla 20.</b> Característica del actuador neumático .....	79

<b>Tabla 21.</b> Valores del aire abierto y cerrado de los actuadores.....	80
<b>Tabla 22.</b> Característica del cilindro neumático.....	81
<b>Tabla 23.</b> Característica de la electroválvula.....	82
<b>Tabla 24.</b> Característica de la unidad de mantenimiento.....	82
<b>Tabla 25.</b> Características del convertidor I/P.....	84
<b>Tabla 26.</b> Características de la celda de carga.....	85
<b>Tabla 27.</b> Especificaciones del transmisor.....	86
<b>Tabla 28.</b> Especificaciones del transmisor.....	88
<b>Tabla 29.</b> Características de las ruedas.....	89
<b>Tabla 30.</b> Herramientas para la fabricación del tribómetro.....	90
<b>Tabla 31.</b> Consumibles usados para la fabricación del tribómetro.....	90
<b>Tabla 32.</b> Costos de la construcción del equipo.....	98
<b>Tabla 33.</b> Norma de desgaste y dimensiones de las probetas.....	102
<b>Tabla 34.</b> Parámetros de prueba.....	103
<b>Tabla 35.</b> Medición de flujo de arena.....	104
<b>Tabla 36.</b> Calibración de la fuerza.....	106
<b>Tabla 37.</b> Calibración de la fuerza.....	111



## PREFACIO

---

Actualmente, la ingeniería y ciencia de los materiales se enfoca en mejorar el rendimiento y el desempeño operativo de los componentes mecánicos que sufren variadas fallas en sus superficies, debido a diferentes mecanismos de desgaste (por ejemplo, desgaste adhesivo, desgaste abrasivo, etc.) reduciendo su vida útil [1]. El desgaste abrasivo se presenta cuando partículas duras interactúan entre dos superficies más blandas, estas partículas abrasivas, pueden ser las propias asperezas de la superficie o bien el mismo producto del desgaste de las mismas; que tienden a cortar o remover material de la superficie, lo que crea escombros o causa una severa deformación plástica (superficial y subsuperficial), la manera en la que se deforma o remueve de su superficie se denomina *mecanismo de desgaste*, el cual puede ser por micro arado, micro fatiga, micro corte o micro agrietamiento [2].

El fallo de los elementos mecánicos sometidos a rozamiento y su posterior desgaste, provoca pérdidas de energía considerables y una vida útil más corta. Por esa razón, debe existir una forma de estudiar el comportamiento del desgaste de los materiales [3], para que los datos obtenidos se puedan implementar en planes de mantenimiento. De este modo, el desgaste comienza a convertirse en un tema importante para estudiar y comprender; ideas simples sobre cómo prevenirlo o combatirlo, comienzan a surgir en la mente de los diseñadores y en los textos de diseño. Sin embargo, esto no es suficiente para mantener la competitividad de los productos, ya que, los diseñadores deben estar abiertos a los problemas y utilizar métodos de diseño apoyados en programas informáticos y trabajo interdisciplinario [4]. La necesidad de reducir los costos de fabricación de maquinaria y el desarrollo tecnológico, ha llevado a la identificación de requerimientos de estudios tribológicos para subsanar estas carencias [5]. Las industrias ansiosas por seguir siendo eficientes en un mercado globalmente competitivo ven la necesidad de mejorar los procesos y evaluar su contribución. En este sentido, consideran que, aumentar la vida útil de los elementos de las máquinas es una opción de mejora que puede identificar el deterioro superficial de los materiales [6].





# 1. Marco Referencial

---

## 1.1. Antecedentes

A nivel internacional, en Ecuador, Acurio [7], realizó el diseño, construcción y puesta en marcha de un equipo para ensayos de desgaste abrasivo. El diseño cuenta con referencia a métodos de prueba estandarizados, tales como la norma ASTM G65, para la medición de la abrasión usando el equipo arena seca/rueda de caucho; norma ASTM G105, para la medición de la abrasión usando el equipo arena húmeda/rueda de caucho y, la norma ASTM B611 para la evaluación de la resistencia al desgaste abrasivo de carburos cementados. Primero, diseñó los componentes principales de la máquina que, son el disco, el difusor de arena y el sistema de brazo de palanca. Una vez que se completó el diseño, llevó a cabo los cálculos analíticos para el mecanismo, la potencia requerida y el diseño de los demás componentes. Posteriormente, determinó el tamaño del motor, el sistema de tacómetro o contador de vueltas y la regulación de velocidad. Efectuó la construcción de las partes mecánicas y el montaje del sistema eléctrico, y finalmente, puso en marcha la máquina, incluyendo la prueba por separado de los diferentes mecanismos: el sistema de brazo, el motor y el punto de tangente al disco. En Santo Domingo en el año 2013, Soto y sus colaboradores [8], diseñaron una máquina que simula el desgaste abrasivo en seco y el desgaste abrasivo en húmedo según los parámetros de la norma ASTM G65 y ASTM G105 respectivamente, la combinación de los dos métodos permitió una configuración que se ajusta totalmente al procedimiento descrito, para lo cual, llevaron a cabo cálculos y evaluaciones de la resistencia mecánica. Además, se analizaron las cargas y esfuerzos para determinar la geometría del diseño, parámetros mecánicos y físicos utilizando la teoría de cálculo de resistencia de materiales. Luego, se seleccionaron los materiales y dimensiones más adecuados, usando herramientas de simulación por medio de un factor de seguridad específico que puede mejorar la fiabilidad del equipo. A nivel nacional. Marulanda y otros [9], diseñaron, construyeron y pusieron en operación un tribómetro que se ajustaba a la norma técnica ASTM G65, adelantaron pruebas para demostrar la confiabilidad de la máquina bajo esta norma. El propósito del tribómetro, consistía en hacer pruebas de desgaste confiables, entendida como una herramienta más para evaluar las propiedades de los

materiales, mejorar el conocimiento tribológico y analizar el comportamiento de diferentes materiales, para predecir el ciclo de vida de las piezas mecánicas; determinar cuándo reemplazarlas y ahorrar tiempo y recursos a la industria.

W. Gutiérrez [10], construyó y puso en marcha un banco de ensayo para la evaluación del desgaste abrasivo con arena seca y rueda de caucho de dos recubrimientos con base níquel según norma ASTM G 65. El primero, Metaceram 23075, con agregados cerámicos de carburo de tungsteno y cobalto WC/Co y el segundo, Nitec 10224 con adiciones de hierro, boro y silicio; aplicados sobre sustratos de fundición gris y bronce fosforado, mediante la técnica de proyección térmica a la llama. En este trabajo, se calibraron las variables como el diámetro y la dureza del revestimiento de caucho, el tamaño de las partículas, la humedad, el flujo de abrasivo, la velocidad del motor y la fuerza aplicada a la muestra. Adicionalmente, se verificó el funcionamiento del equipo por medio de pruebas de desgaste abrasivo de acuerdo con el Procedimiento B de la norma ASTM G65, para obtener resultados repetibles para cada material.

F. Romo y D. Ochoa [11], diseñaron e implementaron una máquina tribológica para evaluar la resistencia al desgaste en seco, la cual cumplió con los lineamientos establecidos por la norma ASTM G65; para la implementación, se validó la máquina por medio de diferentes materiales. La metodología empleada para el diseño, tuvo como finalidad complementar lo obtenido en los cálculos verificados, con los resultados que arrojaron las simulaciones en el software SolidWorks; de esa manera, se procedió a seleccionar los elementos necesarios para la construcción del equipo, y su puesta a punto.

En cuanto al control de los procesos, este ha evolucionado desde el manual hasta el tipo distribuido actualmente, en él, se integran componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos, dando origen a lo que se conoce hoy en día, como la Automatización Moderna [12], en gran parte, gracias a la aparición y el bajo costo del Controlador Lógico Programable (PLC por sus siglas en inglés, Programmable Logic Controller), que ha permitido la integración de sensores, transmisores, y elementos finales de control, para coordinar las tres acciones básicas de un sistema de control: medición, decisión y acción [13]. Para que los equipos de laboratorio de ingeniería



e investigación efectúen una fácil operación y una correcta regulación, es necesario establecer un buen control, que permita obtener el máximo de seguridad y fiabilidad en la muestra. Hoy en día, la automatización en los equipos de evaluación de datos es tal, que la figura del hombre solo se ve en la parte de control y supervisión del sistema [12,13].

## **1.2. Marco Teórico**

### **1.2.1. Tribología**

Según la norma ASTM G40-22a [14], la tribología es la ciencia encargada de estudiar el comportamiento de superficies frente al desgaste, la fricción y la lubricación y cómo estos fenómenos, en caso de no ser bien entendidos, llevan al deterioro de piezas y equipos industriales. Por tanto, es un tema de carácter interdisciplinar, coadyuvado por varias disciplinas, dentro de las que se destacan la física, la química, la ingeniería mecánica, la ingeniería de materiales, entre muchas otras. Incluso, la naturaleza misma, nos muestra numerosos ejemplos de la presencia de este fenómeno y la forma en la que puede ser evidenciada [3, 4,5]. El principal objetivo de la tribología, es alargar la vida de una máquina, reduciendo la fricción y el desgaste de sus componentes, evitando interrupciones en el funcionamiento por sobrecalentamiento, fallas y otros fenómenos asociados al descuido de la lubricación, así como al desgaste, optimizando la transferencia de energía en los componentes mecánicos. Aunque el término tribología se ha utilizado desde mediados del siglo XX.

El interés por la tribología va más allá de la historia misma, ya que, se descubrió que las herramientas de perforación utilizadas en la era Paleolítica, se sujetaban con un casquillo hecho de asta o hueso. Documentos históricos registran, el uso de la rueda cerca del 3500 a. C [15], prueba del interés ancestral por promover movimientos de traslación. Por otro lado, se sabe que los egipcios adquirieron conocimientos sobre la fricción y la lubricación, un ejemplo de ello, se encuentra en sus carruajes, en los que utilizaban primitivos lubricantes a base de grasas animales para soportar los cojinetes de sus ejes [16]. La tribología existe en casi todos los aspectos de la industria moderna; no obstante, algunos de los componentes más populares de esta ciencia son: cojinetes, sellos, frenos, embragues, pistones, engranajes, levas y más. Las aplicaciones comunes consideradas para estudiar la tribología en su operación incluyen motores eléctricos,

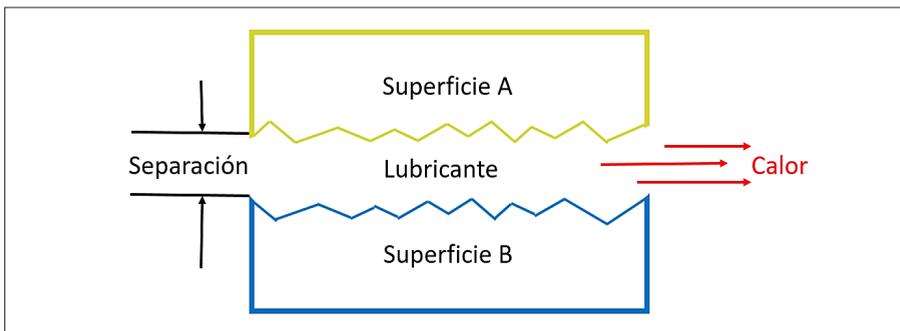
motores de combustión interna, turbinas, procesos de corte, fundiciones y maquinaria en general [16]. En resumen, la aplicación del conocimiento tribológico conduce a:

- Ahorro de materia prima
- Prolongar la vida útil de las máquinas y herramientas
- Conservar los recursos naturales
- Ahorro y optimización de energía
- Protección al medio ambiente
- Ahorro económico

### 1.2.2. Lubricación

Se define como una técnica para reducir la fricción entre dos superficies en contacto y que exhiben movimiento relativo entre sí [15]. El propósito de la lubricación, es separar dos superficies deslizantes opuestas, permitiendo que el proceso de deslizamiento avance con la menor fricción posible para que no haya daños asociados por la fricción entre ellas. La Figura 1., muestra que, mediante la aplicación de una película lubricante de suficiente espesor entre las dos superficies en contacto, se ayuda a soportar la carga o presión desarrollada entre las superficies opuestas para evitar el desgaste.

Durante las operaciones de lubricación, la mayoría de las aplicaciones consideran que el lubricante tiene diferentes tareas durante su operación, que incluyen limpieza, refrigeración, protección, etc. [15]:



**Figura 1.** Película de lubricante entre dos superficies [15]. Figura modificada



- **Lubricante:** Su propósito, es reducir la fricción entre las superficies en contacto, lo que reduce la fricción, el desgaste y, por lo tanto, permite una mejor transferencia de energía.
- **Refrigerante:** Cualquier material que reduzca la fricción, actuará como refrigerante, ya que, la reducción de la fricción reduce la temperatura de funcionamiento de los componentes. Por otra parte, algunas máquinas, aunque correctamente lubricadas, generan mucho calor durante su funcionamiento. Para evitar el sobrecalentamiento, los lubricantes a menudo, pueden transferir calor de áreas más calientes a áreas más frías. Un ejemplo de tal aplicación, es la de lubricantes/refrigerantes durante el mecanizado, donde el lubricante previene el desgaste excesivo durante el desbaste, lo que a su vez, puede disipar el exceso de calor del proceso.
- **Anticorrosiva:** Por naturaleza, los lubricantes no deberían crear corrosión en las superficies, lo ideal es que protejan o inhiban los daños causados por el agua, los ácidos y otros agentes, que, pueden contaminar el sistema. La protección contra la corrosión de los lubricantes toma dos formas: una, es proporcionar una barrera física para prevenir el ataque químico, y la otra, es neutralizar los químicos corrosivos que pueden generarse durante la operación del equipo.
- **Mantenimiento o limpieza:** La eficiencia de un equipo puede verse afectada por la contaminación de sus componentes con sustancias comunes como polvo, arena, productos corrosivos o abrasivos. Las partículas sólidas pueden aumentar el desgaste, corroer o bloquear las líneas de lubricación y los filtros. Durante el proceso de lubricación, estos ayudan a limpiar los dispositivos mecánicos, y en algunos casos, se agregan aditivos especiales a los lubricantes para dispersar partículas contaminantes en el aceite, partículas en suspensión, antioxidantes, etc.

### 1.2.3. Fricción

Es definido como el rozamiento o fricción dado entre dos superficies en contacto con la fuerza, y que a su vez, impide que una superficie se mueva sobre la otra (rozamiento cinético), o la fuerza que no deja iniciar el movimiento (rozamiento estático). Todas las fuerzas de fricción, están en

dirección opuesta al movimiento relativo entre las superficies [16]. Existen dos tipos principales de rozamiento o fricción, el rozamiento estático y el rozamiento dinámico o cinético.

### 1.2.3.1. Fuerza de rozamiento estática

Conocida como la fuerza que se produce entre dos objetos que no se mueven entre sí. En la Figura 2., se muestra que la fuerza ( $F$ ) aplicada a un lado del bloque con peso  $W=mg$  aumenta gradualmente, pero, el bloque permanece estacionario. Dado que la aceleración es cero, la fuerza aplicada es igual y contraria a la fuerza de rozamiento estático ( $F_s$ ). La fuerza máxima de rozamiento, corresponde al momento en el que el bloque está a punto de deslizarse, esto es:

$$F_s = \mu_s \cdot N \quad (\text{Ec 1})$$

Donde,

$F_s =$  Fuerza de fricción estática (N)

$\mu_s =$  Coeficiente de fricción

$N =$  Fuerza normal (N)

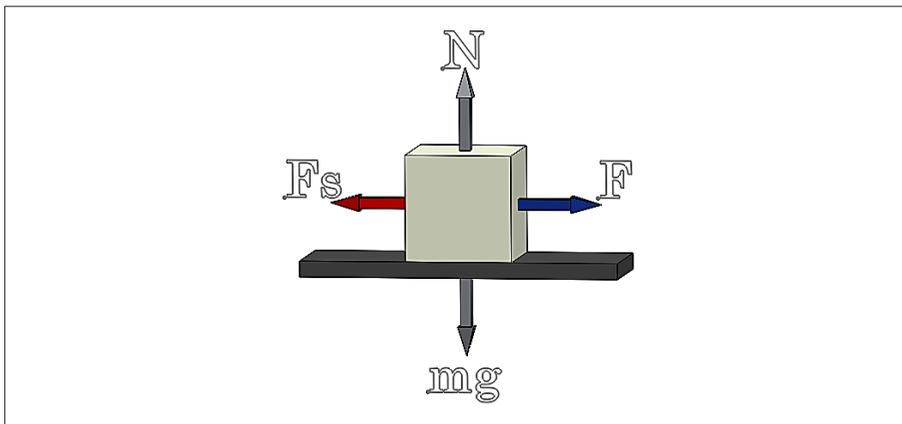


Figura 2. Fuerza de rozamiento estática  $F_s$  [15].



### 1.2.3.2. Fuerza de rozamiento cinemática

La Figura 3., muestra un bloque, el cual es arrastrado por una fuerza horizontal ( $F$ ). De igual forma, se visualizan en el bloque otras fuerzas como el peso ( $m.g$ ), la fuerza normal equivalente al peso y la fuerza de rozamiento al plano sobre el que se desliza. Si el bloque se desliza con rapidez constante, la fuerza aplicada será igual a la fuerza de fricción. Al duplicarse la masa del bloque, consecuentemente, se duplica la fuerza normal, la fuerza para jalar el bloque; y, finalmente, la fuerza cinética ( $F_k$ ). Por lo tanto, la fuerza de fricción cinética es proporcional a la fuerza normal ( $N$ ).

$$F_k = \mu_K \cdot N \quad (\text{Ec } 2)$$

Donde,

$F_k$  = Fuerza de Fricción Cinemática (N)

$\mu_K$  = Coeficiente de Fricción Dinámico

$N$  = Fuerza normal (N)

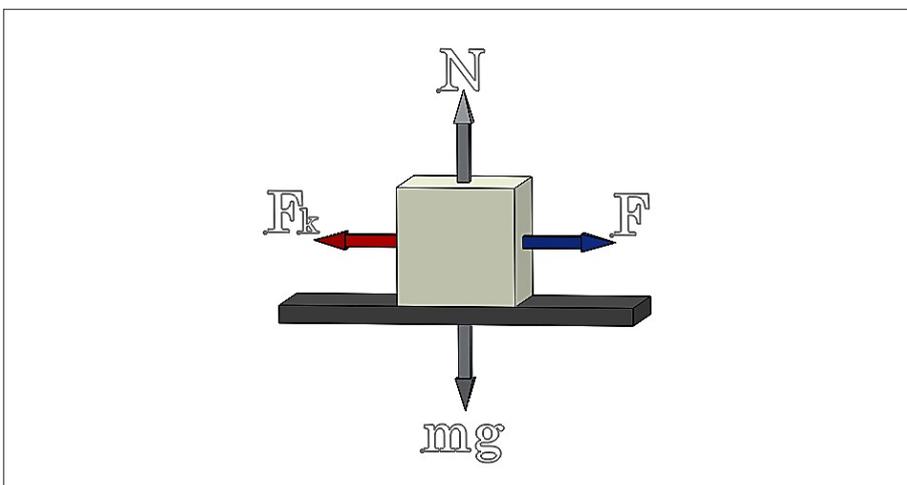


Figura 3. Fuerza de rozamiento cinética  $F_k$  [15].

### 1.2.3.3. Fuerzas de rozamiento en el disco

Para entender la física del proceso en el diagrama (Figura 4), se puede observar, que, coinciden las fuerzas que interactúan en el plano, ellas son: la fuerza normal y la fuerza de empuje resultante, que, al sumarse arrojan un mismo valor y este se aprecia en la igualdad  $N = Fr$ .

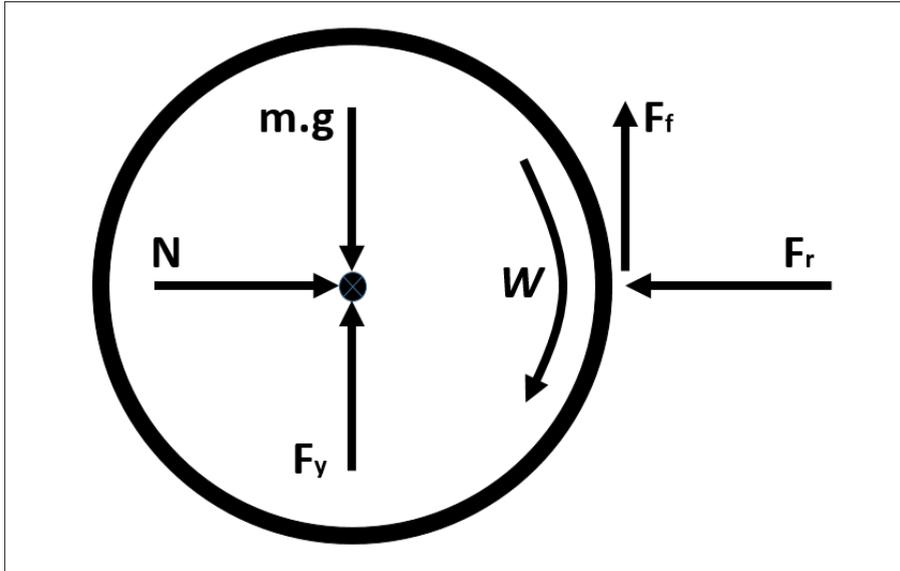


Figura 4. Diagrama de fuerzas resultantes en un disco.

Sumatoria de fuerzas en el eje x:

$$\sum F_x = 0$$

$$Fr - N = 0$$

$$N = Fr$$

La fuerza de rozamiento es tangencial al movimiento del disco, por lo tanto, se tiene:

$$P = T \cdot w$$

$$P = F \cdot r \cdot w \quad (\text{Ec 3})$$



dónde,  $P$  es la potencia,  $F$  es la fuerza,  $r$  es el radio del disco con mayor fuerza y  $w$  es la velocidad angular. Ahora bien, se conoce que la fricción estática es mayor que la fricción cinética porque la primera solo se aplica en el umbral del movimiento, debido a lo anterior se tiene que:

$$\mu_s > \mu_k$$

Si se asume que los coeficientes estáticos y cinéticos pertenecen al mismo conjunto de materiales sometidos a rozamiento, en este caso, la fuerza normal o fuerza resultante se reduce debido al coeficiente estático, este enfoque se expone a continuación por medio de la ecuación (4) cuando se reemplaza la fuerza máxima por la fuerza estática ( $F \cong f_s$ )

$$P = f_s * r * w$$

Y se procede a reemplazar  $f_s$  :

$$P = \mu_s * N * r * w$$

Se despeja la normal ( $N$ );

$$\downarrow N = \frac{P}{\mu_s * r * w} \quad (\text{Ec 4})$$

A diferencia de la ecuación que se presentó anteriormente, para el caso con el coeficiente cinético, la fuerza normal aumenta; entonces, del mismo modo, en la ecuación (4) se reemplaza la fuerza máxima por la fuerza cinética ( $F \cong f_k$ )

$$P = f_k * r * w$$

Y se procede a reemplazar  $f_k$  :

$$P = \mu_k * N * r * w$$

Se despeja la normal ( $N$ );

$$\uparrow N = \frac{P}{\mu_k * r * w} \quad (\text{Ec 5})$$

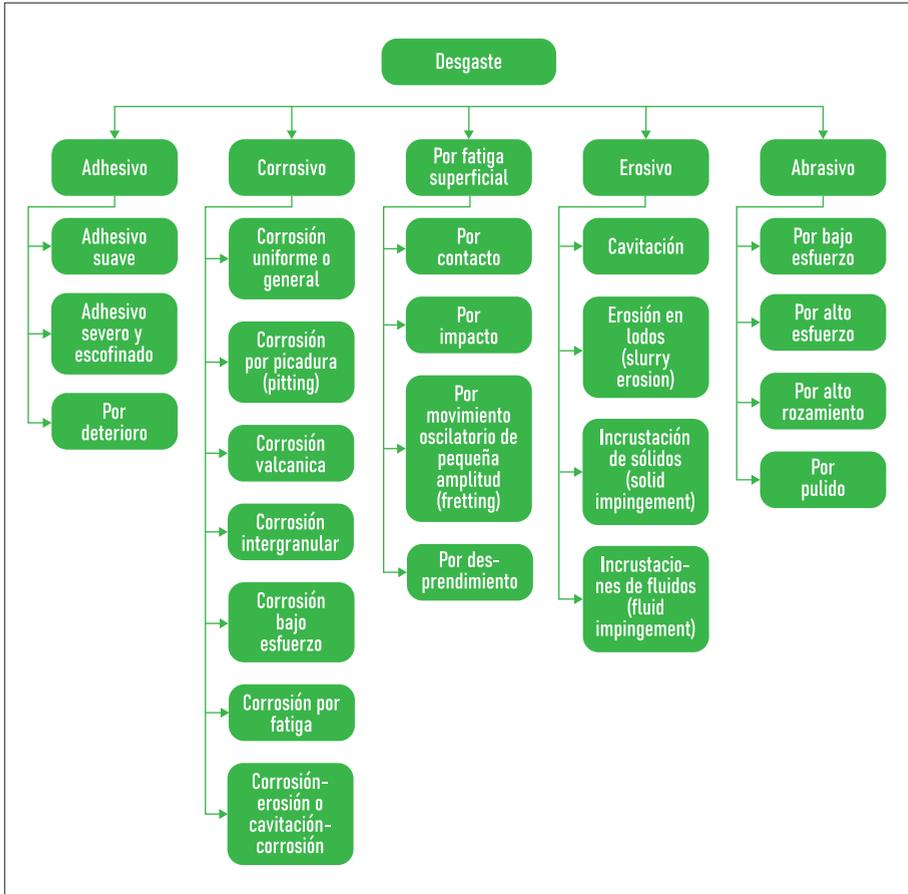
## **1.2.4. Desgaste**

Es el daño superficial que presenta un material en determinadas condiciones de funcionamiento, suele manifestarse en la superficie del material, afectando en ocasiones la subsuperficie [16]. En el ámbito industrial, el desgaste es un aspecto importante, porque puede tener consecuencias irreversibles para el material expuesto a este fenómeno; ya que, reduce de manera considerable la vida útil de los mecanismos o máquinas. Esto puede conducir a tener cambios prematuros en sus componentes o reemplazo de todo el mecanismo. La remoción de material en la superficie se puede presentar de tres formas: por fusión, por disolución química o por separación física de átomos de la superficie. Esto último, se puede lograr aplicando una fuerza que causa una alta deformación en el material [17].

Existen diferentes técnicas para disminuir el desgaste, las cuales pueden ser: Mejores prácticas de lubricación, mantenimiento regular a los componentes expuestos al desgaste, aplicación de recubrimientos e incluso, tratamientos térmicos a los materiales expuestos; pero, lo realmente importante antes de tener un gasto significativo en el momento de prevenir el desgaste, es conocer todas las variables que lo afectan, tratar de eliminarlas o reducirlas, y cuando sea infructuosa esta actividad, se recomienda llevarlo al laboratorio para evaluar cuál puede ser la mejor solución.

### **1.2.4.1. Clasificación del desgaste**

En esta clasificación (Figura 5), se consideran dos aspectos principales: el primero se basa en el desgaste de la pieza o el conjunto de elementos; por ejemplo, picaduras, degradación, estrías, etc. El segundo aspecto, utiliza y considera principalmente la base del mecanismo o acción tribológica [11].

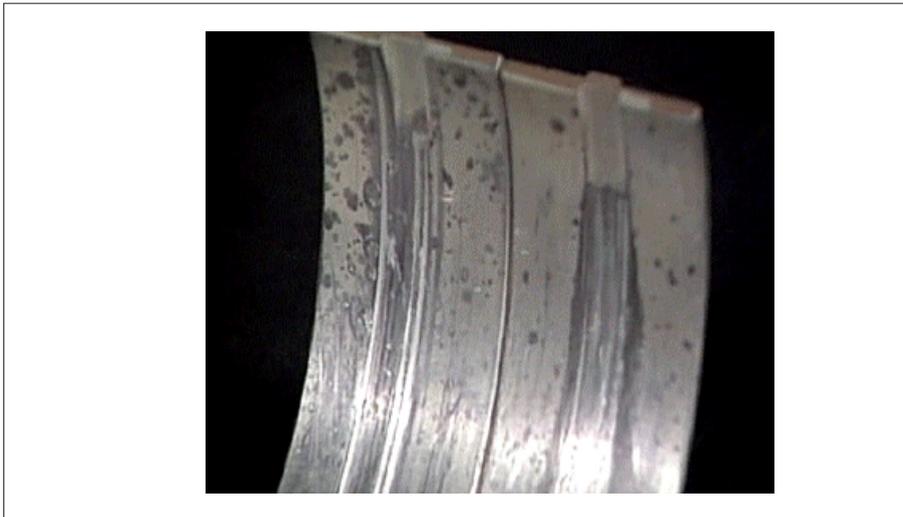


**Figura 5.** Clasificación del desgaste [7].

#### 1.2.4.1.1. Desgaste abrasivo

Es el producto de la remoción de material de una superficie que está en contacto con partículas sólidas coincidentes entre superficies, o con superficies duras que presentan fricción; este proceso se presenta en caso de corte, rayado, astillado o agrietamiento por fatiga; las tasas de desgaste pueden verse afectadas abruptamente por la presencia de partículas abrasivas entre las superficies, la velocidad de contacto en movimiento relativo y las condiciones ambientales [17, 18]. Este desgaste se produce en presencia de lubricación, ya que su contaminación puede provocarlo.

Cuando dos superficies están en contacto, ambas están sujetas a desgaste, una de ellas produce mayor daño y la que tiene menos daño, se denomina superficie abrasiva. La cantidad de daño producido, depende del tamaño de la arena o de las partículas residuales del maquinado que crean rayones y rayones profundos (Figura 6).



**Figura 6.** Ejemplo del desgaste abrasivo [28].

La forma más fácil de detectar el desgaste abrasivo es mediante sus consecuencias, las cuales son [2]:

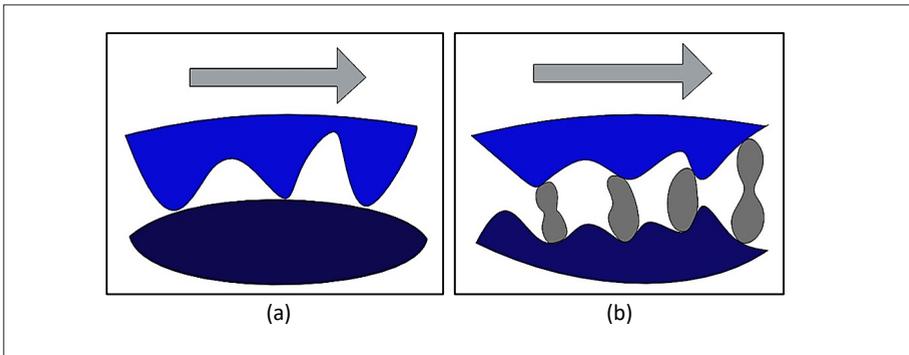
- Penetración de partículas con alta dureza de una superficie en la otra.
- Remoción de partículas superficiales.
- Fractura de los materiales afectados.
- Disminución de tamaño de los materiales afectados.
- Remoción de recubrimientos protectores.

El desgaste por abrasión, se divide en dos categorías: según el tipo de contacto y al nivel de daño generado.

- Abrasión por tipo de contacto. Puede manifestarse como desgaste entre dos o tres objetos, como se muestra a continuación:
- Abrasión de dos cuerpos: Se produce cuando la superficie irregular de un material se presiona contra otro material de menor dureza (Figura 7(a)).



- Abrasión de tres cuerpos: Esto sucede cuando hay partículas más duras intercaladas entre dos superficies. La fuerza aplicada se transmite a través de los granos abrasivos (Figura 7(b)).

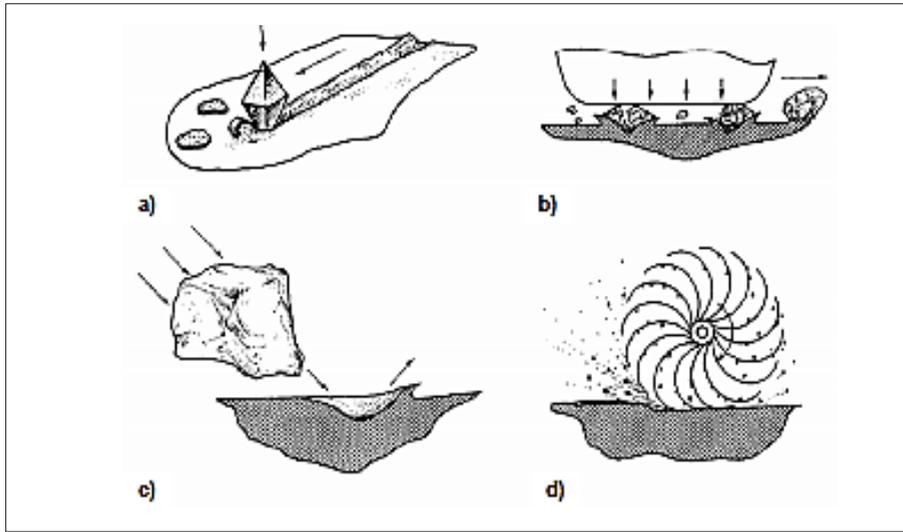


**Figura 7.** (a) Representación de abrasión en dos cuerpos [14]; (b) Representación de abrasión en tres cuerpos [15].

El desgaste abrasivo de tres cuerpos es de 2 a 10 veces menos intenso que el desgaste de dos cuerpos, ya que solo una pequeña cantidad de abrasivo es la fuente del desgaste [15].

- Abrasión por nivel de daño generado
- Abrasión de bajo esfuerzo o rayado: Ocurre debido a la fricción relativamente ligera de partículas abrasivas contra una superficie o elemento metálico. La carga es lo suficientemente baja, como para que las partículas no se desintegren ni se dividan. Por lo general, el daño se presenta en forma de rasguños con poca deformación superficial (Figura 8(a)).
- Abrasión de alto esfuerzo o desbaste: Es una situación en la que la fuerza aplicada entre las dos superficies es lo suficientemente alta como para aplastar las partículas, se produce una deformación plástica en este desgaste y el material se raya y astilla debido a la presión de las partículas contra el cuerpo (Figura 8(b)).
- Abrasión por surcos o ranuración (Gouging): Se refiere a la remoción de material debido a la acción repetida de altas cargas de compresión creadas por partículas grandes como la roca, dejando grandes surcos en la superficie de desgaste (Figura 8(c)).

- Abrasión por pulido: Este es un desgaste muy suave y fino, el material se elimina frotando contra otras superficies, los rayones no se notan mucho, no hay fractura ni deformación plástica (Figura 8(d)).



**Figura 8.** (a) Esquema de desgaste de bajo esfuerzo; (b) Esquema de abrasión de alto esfuerzo; (c) Esquema del desgaste por surcos; (d) Esquema de un pulido de un metal con una rueda de pulido [7].

#### 1.2.4.1.2. Desgaste corrosivo

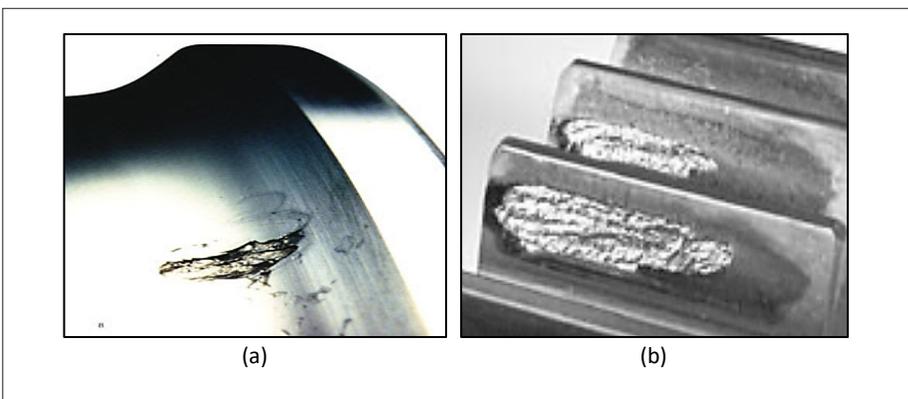
Se desgasta debido a las influencias ambientales, generalmente, por la humedad o la incompatibilidad química (Figura 9). Se puede decir, que, es la primera etapa que de manera común, resulta del desgaste, fatiga o erosión de la capa de corrosión. Este grupo también incluye el desgaste oxidativo, como efecto de la acción del oxígeno atmosférico disuelto en el lubricante, creando daños en la superficie [15].



**Figura 9.** Ejemplo de desgaste corrosivo [17].

#### 1.2.4.1.3. Desgaste por fatiga superficial

Resultado de la tensión cíclica entre las asperezas de las dos superficies de contacto (Figura 10). El coeficiente de fricción es el factor decisivo porque cuando la superficie está lubricada, el desgaste por adherencia es mínimo; sin embargo, en sistemas con coeficientes de fricción muy altos, pueden ocurrir áreas de deformación severa muy cerca de la superficie, creando grietas ligeras [15].



**Figura 10.** (a) Desgaste por fatiga superficial en rodamiento; (b) Ejemplo de desgaste por fatiga en engranaje [28].

#### 1.2.4.1.4. Desgaste por erosión

Esto ocurre cuando los impactos repetidos de partículas sólidas o líquidas (o ambas), ejercidas sobre una superficie, provocan la separación del material (Figura 11). El desgaste por erosión, comúnmente prospera en elementos expuestos a flujos de alta velocidad, como turbinas o escapes de motores. Puede explicarse como un efecto de choque, ya que, las partículas son arrastradas por el fluido y son más pesadas que el fluido. Cuando cambia la dirección en la que se mueve el fluido, el impulso empuja las partículas más pesadas hacia adelante y golpea las esquinas y las restricciones, causando daños a la superficie. Se caracterizan por abolladuras y pequeñas marcas en la superficie [15].

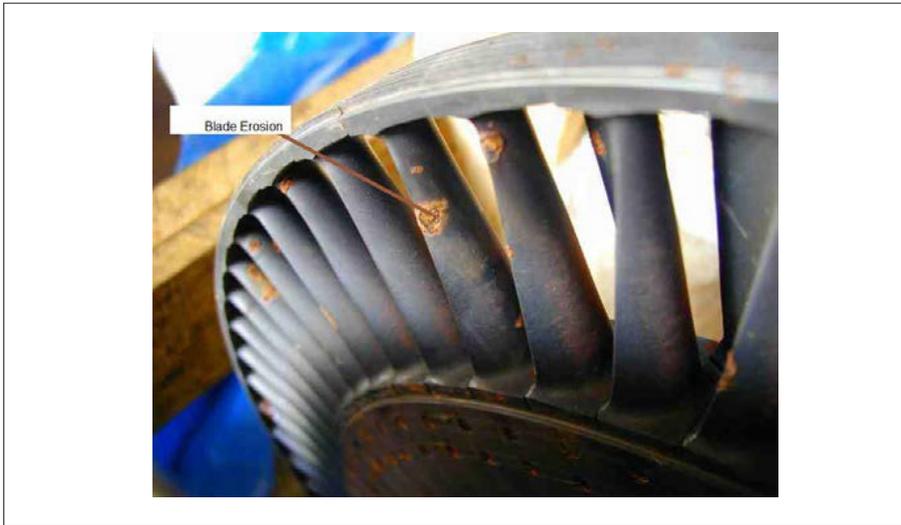
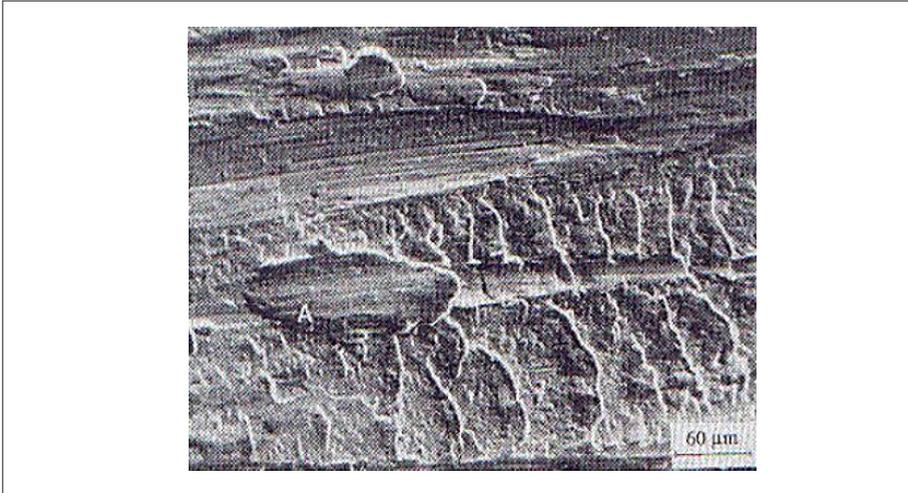


Figura 11. Ejemplo de desgaste por erosión [20].

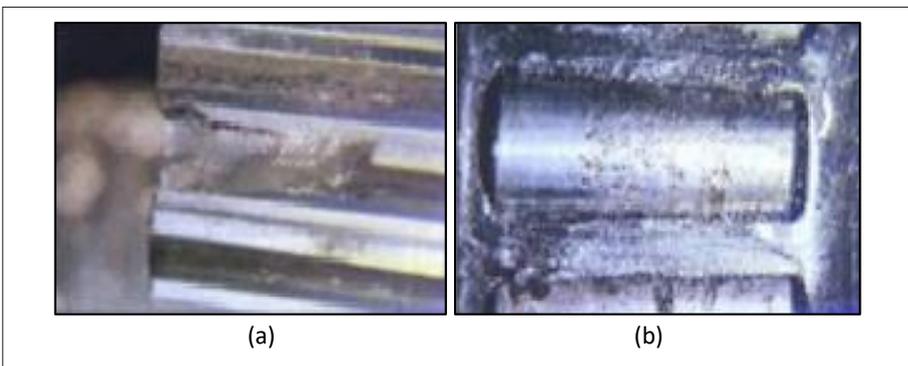
#### 1.2.4.1.5. Desgaste adhesivo

Ocurre cuando dos superficies de contacto se deslizan una contra la otra bajo presión. Si se observa a nivel microscópico, la rugosidad que existe entre los elementos de contacto que se deslizan debido a la alta tensión en la parte superior, hace que la fuerza de deslizamiento rompa la junta, arrancando el material de una superficie y transfiriéndolo a la otra. Se causará daño más adelante [15]. La Figura 12., muestra una micrografía de los daños causados por el desgaste adhesivo sobre el acero AISI D1.



**Figura 12.** Daño causado por desgaste adhesivo al Acero AISI D1 [19].

Como se muestra en la Figura 13., el desgaste adhesivo se presenta como resultado de la adhesión entre puntos de contacto desiguales presentes en la interfaz [24].



**Figura 13.** (a) Ejemplo de desgaste por adhesión en engranaje; (b) Ejemplo de desgaste por adhesión en rodamiento de rodillo cónico [19].

#### 1.2.4.2. Variables que afectan el proceso de desgaste

El estudio del desgaste se enriquece considerando la cantidad de factores necesarios para describirlo. Los principales factores que interfieren con el desgaste pueden ser los siguientes:

- Variables relacionadas con las propiedades de los materiales en contacto. Estructura, tenacidad dureza y composición química.
- Variables relacionadas con el servicio. Acabado de la superficie, temperatura, materiales en contacto, presión, velocidad, lubricación y corrosión. El desgaste que realmente ocurre es en la mayoría de los casos, una combinación de diferentes tipos de desgaste. Las partículas pequeñas entre dos superficies de contacto o los productos del proceso de corrosión pueden causar desgaste y daños posteriores.

#### **1.2.4.2.1. Efecto de la temperatura y la velocidad sobre el desgaste**

Con el tiempo, ha quedado demostrado, que, el desgaste en metales, depende principalmente de la interacción de la rugosidad entre dos superficies deslizantes. La energía disipada por el trabajo mecánico, conduce inevitablemente a un aumento de la temperatura, aunque esto sucede de manera intermitente, en lo que se refiere a los puntos de contacto real por la adherencia y posterior deslizamiento de las uniones. Estos incrementos momentáneos de temperatura, tienen una duración del orden de  $10^{-4}$  segundos [11]. El calor de la fricción se disipa hacia el área circundante, lo que hace que la punta áspera alcance altas temperaturas, aunque el cuerpo de la pieza permanezca relativamente frío. Un aumento de la carga o de la velocidad de deslizamiento acrecienta la temperatura articular y, en casos extremos, puede conducir a una fusión incipiente [8]. No existe una manera fácil de medir la temperatura del área de contacto real, pero, se puede obtener la temperatura general de un par de metales que interactúan. Dado que, tanto el desgaste adhesivo como el desgaste abrasivo consideran las propiedades mecánicas, como el límite elástico y la dureza del metal, se ven afectadas por el entorno térmico, se pueden realizar fácilmente estudios tribológicos y de desgaste a altas temperaturas, condición importante, porque las piezas giratorias deben funcionar a estas temperaturas [11].

#### **1.2.4.2.2. Solubilidad**

La influencia del desgaste sobre el crecimiento de las uniones a nivel atómico del material afectado, se puede correlacionar de forma cualitativa con parámetros como la solubilidad sólida de las combinaciones metálicas. La magnitud del desgaste aumenta a medida que el material se desliza



en el vacío por la soldadura de asperezas sólidas que forman uniones fuertes que crecen y se unen. Dada la naturaleza efímera de la vida útil de los enlaces químicos, es difícil imaginar cómo se forman y desarrollan nuevos enlaces, ya que el crecimiento debe ocurrir a través de la difusión a escala atómica y el proceso depende del tiempo. El aumento brusco y transitorio de la temperatura, puede contribuir al desarrollo de la unión porque la velocidad de difusión aumenta con el incremento de la temperatura [11].

#### **1.2.4.2.3. Estructura cristalina**

La interacción plástica de las partículas superficiales de los metales al contacto con otro material genera desgaste, al presentarse deformación plástica en los metales, ocurre un deslizamiento, lo que produce un corte de los planos de los átomos y genera una falla por apilamiento, lo que conlleva a que se produzca un deslizamiento anisotrópico, y la dirección es casi siempre, en la que los átomos están más juntos. El plano de deslizamiento es también, el plano que tiene mayor número de átomos; por lo tanto, para metales cúbicos con caras centradas, la dirección de deslizamiento varía según la estructura cristalina.

#### **1.2.5. Métodos para realizar ensayos de desgaste**

Un análisis de desgaste es importante porque junto con la fatiga y la corrosión, es la causa más común de falla de las máquinas. De los tres fenómenos, el desgaste es el menos estudiado porque su predicción es difícil, ya que no es una propiedad inherente del material, sino que depende de todo el sistema, que interactúa con el cuerpo desgastado [30]. Existen diferentes asociaciones, organizaciones, grupos de investigación, universidades, entre otros, que están muy interesados en caracterizar el fenómeno del desgaste y todas las variables inherentes a este, una de dichas organizaciones es la “ASTM”, la cual busca mediante normas, brindar parámetros para la construcción de equipos y medir el desgaste en condiciones puntuales; de allí, nace la guía estándar para la elaboración y selección de ensayos de desgaste abrasivo, bajo el nombre ASTM G190; incluye información general para el desarrollo y la selección de un ensayo de desgaste para una aplicación deseada [19] (Tabla 1).

### 1.2.5.1. NORMA ASTM G65

Es un método estándar para medir la abrasión en la interfaz arena seca/rueda de caucho, aplicada sobre la probeta. Esta norma define las operaciones estandarizados para la determinación de la resistencia al desgaste de los materiales, su clasificación viene explícita básicamente por un procedimiento para la determinación de la resistencia al desgaste que puede tener un material. El ensayo se lleva a cabo con arena estándar y un tamaño de partícula específico.

**Tabla 1.** Lista de pruebas para el estudio del desgaste [19].

NORMA	DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO
ASTM B-611	Método de prueba estándar para determinar la carga, alta resistencia a la abrasión de materiales duros
ASTM G-56	Método de prueba estándar para abrasión de cintas de tela impregnada de tinta de la impresora y otros materiales de la Web
ASTM G-75	Método de prueba estándar para la determinación de la abrasividad de la lechada (número de Miller), y la respuesta a la abrasión de los materiales de la lechada (número de SAR)
ASTM G-77	Método de prueba estándar para clasificar la resistencia de los materiales al deslizamiento usando una prueba de desgaste de bloque sobre anillo
ASTM G-81	Método de prueba estándar para el ensayo a la abrasión por pulido de las trituradoras de mandíbula
ASTM G-98	Método de prueba estándar para la resistencia al desgaste cuando se presenta muy alta fricción de los materiales
ASTM G-99	Método de prueba estándar para pruebas de desgaste con un aparato Pin-On-Disk
ASTM G-119	Guía estándar para determinar la sinergia entre el desgaste y la corrosión
ASTM G-132	Método de prueba estándar para el ensayo de abrasión tipo Pin
ASTM G-137	Método de prueba estándar para clasificar la resistencia de los materiales plásticos al deslizamiento usando una configuración de bloqueo en anillo
ASTM G-171	Método de prueba estándar para dureza al rayado de los materiales usando una aguja de diamante
ASTM G-174	Método de prueba estándar para medir la resistencia a la abrasión de los materiales mediante contacto con lazos abrasivos
ASTM G-176	Método de prueba estándar para clasificar la resistencia al deslizamiento de los plásticos usando una prueba de desgaste de bloque sobre anillo: método de desgaste acumulado



ASTM G-195	Método de prueba estándar, hace pruebas de desgaste utilizando una máquina de plataforma rotativa para medir la resistencia a la abrasión
ASTM G-204	Método de prueba estándar para el daño de superficies sólidas que se encuentran en contacto bajo condiciones de fricción
ASTM G-206	Guía estándar para medir los volúmenes de desgaste de los segmentos de anillos de pistón, utilizado contra caras planas en pruebas de desgaste recíproco o de vaivén

De acuerdo con el procedimiento utilizado en el ensayo, se debe aplicar una carga específica a la pieza, para que la muestra entre en contacto con la rueda de goma.

La Tabla 2., enumera los cinco procedimientos estandarizados utilizados en la norma ASTM G-65 para pruebas de desgaste abrasivo, clasificados según el grado de resistencia al desgaste del material o el espesor del recubrimiento sobre el material [1]. Además, se enumeran los parámetros básicos necesarios para realizar el ensayo, a saber: fuerza aplicada a la muestra, número de revoluciones de la rueda y desgaste lineal (distancia de desgaste).

**Tabla 2.** Lista de procedimiento de la norma ASTM G65 [21].

PROCEDIMIENTO ASTM	FUERZA EJERCIDA / PROBETA		REVOLUCIONES DE LA RUEDAS	DISTANCIA DE DESGASTE	USO
	N	lb		m	
A	130	30	6000	4309	Materiales con media a extrema resistencia a la abrasión.
B	130	30	2000	1436	Materiales con alta resistencia a la abrasión, pero es usado en materiales de media a baja resistencia a la abrasión. Se aplica cuando la pérdida de volumen desarrollado por el procedimiento A excede los 100 mm <sup>3</sup> .
C	130	30	100	71.8	Para uso en capas delgadas.
D	45	10.1	6000	4309	Se utiliza en materiales con baja resistencia a la abrasión.
E	130	30	1000	718	Materiales con media a baja resistencia a la abrasión.

### 1.2.5.2 NORMA ASTM G105

En este método, el abrasivo se introduce entre la muestra de prueba y la rueda giratoria recubierta con neopreno de una dureza determinada. La muestra de prueba, se presiona contra la rotación de la rueda con una fuerza específica mediante un brazo de palanca mientras se raspa la superficie de prueba. Las marcas de desgaste que producen las probetas son provocadas por la abrasión de la arena disuelta en agua [22]. Las indicaciones que estipula la norma son las siguientes:

- Motor de 0,75 KW o 1 HP.
- Para la prueba se requieren tres discos, cada uno con durezas nominales diferentes, estos valores son de 50, 60 y 70 Shore A con una tolerancia de +/- (2); cada disco debe tener un diámetro de 7 pulgadas (177,8mm) con un espesor de 0.5 pulgadas (12,7mm) con un cuerpo macizo en acero 1020 de diámetro 6 pulgadas (152,4mm), y una vulcanización en el extremo con neopreno que debe alcanzar tres valores de dureza.
- El peso por colocar en el extremo del brazo debe ser de 222,4 +/- 3,6 (N), este peso es el que hace que la probeta se ubique sobre la superficie de contacto con el neopreno y así obtener al rotar el disco el desgaste.
- Uno de los factores más importantes a los que se debe prestar atención para la realización de la prueba, es la mezcla de agua con la arena, para obtener la mezcla, se toman los siguientes componentes: 0,940 kg de agua y 1,500 kg de arena de sílice, esta mezcla se puede utilizar tan solo en el transcurso del ensayo, después de ese tiempo, la mezcla perderá su mayor potencial abrasivo, por lo cual, se debe desechar posterior a la prueba [22].



## 2. Metodología

---

### 2.1. Rediseño del equipo

El objetivo principal de este trabajo, fue el rediseño y automatización del tribómetro rueda de caucho y arena seca regido por la norma ASTM G65, que se encuentra ubicado en el laboratorio de tribología de la Universidad del Atlántico (Figura 14). Adicional a esto, se analizó la viabilidad de implementar la norma G105 para evaluar la resistencia al desgaste en condiciones húmedas. Como actividades para el cumplimiento de este objetivo están:



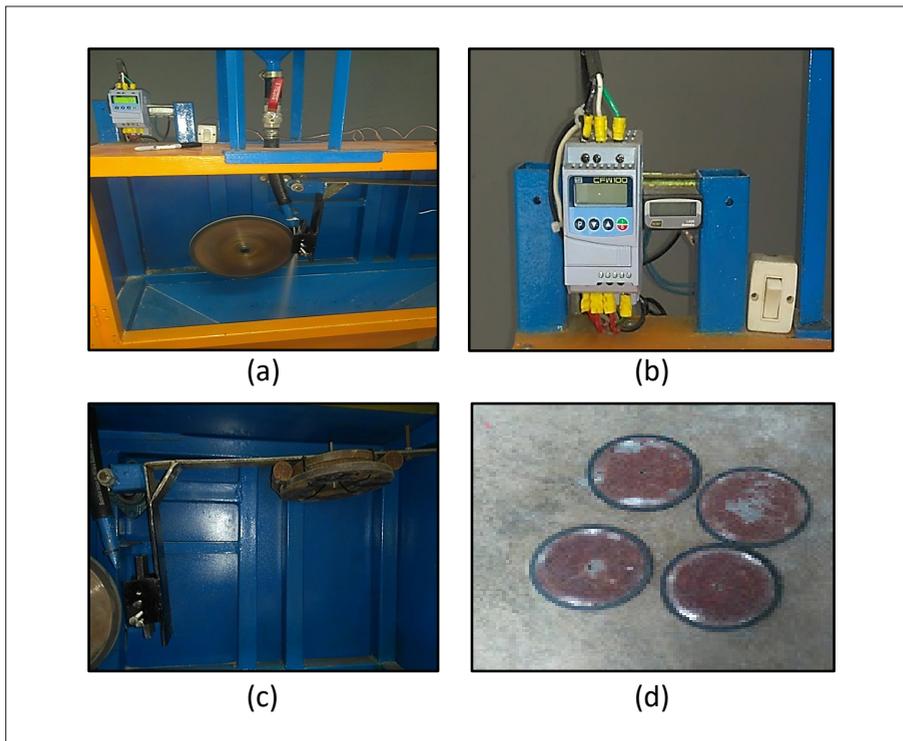
**Figura 14.** Tribómetro rueda de caucho y arena seca según norma ASTM G65.

#### 2.1.1. Caracterización del equipo

Se tomaron las medidas generales del equipo, se inspeccionó cada uno de sus elementos para verificar su estado actual, se analizaron los componentes eléctricos para determinar el tipo de corriente necesaria para su accionamiento.

### 2.1.2. Pruebas experimentales preliminares

Se ejecutaron pruebas siguiendo las indicaciones de la normativa ASTM G-65, con las cuales se detectaron fallas en el diseño y se identificaron las mejoras necesarias para la implementación de la norma ASTM G105; además, se determinaron los elementos principales para convertir el proceso de accionamiento de forma automatizada (Figura 15a).



**Figura 15.** (a) Tribómetro en funcionamiento; (b) Variador de velocidad y contador de vueltas de tribómetro; (c) Brazo y contrapeso del tribómetro rueda de caucho y arena seca; (d) Discos de caucho del tribómetro.

Se determinó que el equipo cumplía con las condiciones mínimas para su funcionamiento. Se aplicaron los principios de la norma ASTM G65 de forma adecuada, pero, algunos de sus elementos presentaron anomalías que dificultaban el accionamiento y control del proceso.

- **Estructura:** Cuando se llevó el motor a su potencia máxima, la estructura tendió a vibrar, ya que no tenía planchuelas de estabilización en el



piso. Para corregir este detalle, se decidió cambiar la tubería cuadrada de 38 mm a 50 mm, determinación respaldada con cálculos estructurales y simulación de esfuerzos en el software SolidWorks.

- **Puerta y cubierta metálica:** La puerta no contaba con manijas para su apertura y el cerrojo no era el adecuado. No había manera de apreciar el proceso en ejecución, razón por la que se decide cambiar la puerta y la cubierta por láminas galvanizadas con espacio para láminas de acrílicos, unidas mediante tornillos.
- **Tolva de arena:** Su material era de acero al carbono calibre 16, se encontraba sujeta a la cubierta por dos pestañas en lámina de acero, se cambia el diseño y el sistema de sujeción, además de agregar un cofre en láminas de acrílico para la protección de las válvulas.
- **Variador de velocidad:** El variador que trabaja con el motor seleccionado es un modelo WEG CFW100, el cual tenía un modo vectorial (VVW), donde la operación era optimizada para el motor en uso, obteniendo en su momento, un mejor desempeño en términos de torque de regulación de velocidad, este elemento no era compatible con el PLC, por ende, se retiró del equipo (Figura 15b).
- **Contador de vueltas:** Estaba conectado a un sensor inductivo Autronics PR12-4DN, dicho sensor, era alimentado con una fuente de 24 voltios, y se encontraba en un lazo de control con el contador Autronics LA8N-BN, este brindaba la posibilidad de medir la cantidad de vueltas que se producían en el momento de la prueba. El elemento se encontró en buen estado, pero su configuración no era compatible con el PLC, razón por la que no se utiliza (Figura 15b).
- **Brazo y contrapeso:** A pesar de que el brazo cumplía con las dimensiones según la norma, no sucedía lo mismo con el contrapeso, ya que estaba compuesto de materiales de diferentes dimensiones las cuales no estaban clasificadas ni marcadas con su verdadero peso; además, lo más crítico, se evidenciaba en la forma de sujeción, ya que era con amarres plásticos y tornillos, lo que generaba una sensación de inseguridad en el agarre. Así las cosas, se determinó cambiar este mecanismo por un cilindro neumático, el cual estaría directamente conectado al sistema automatizado (Figura 15(c)).

- **Discos:** Se encontraron 5 discos con iguales dimensiones y recubrimiento, por lo que se decidió utilizar 2 para la norma ASTM G65 y modificar 3 para la norma ASTM G105, dentro de las modificaciones que se implementaron está: reducir el diámetro, cambiar el recubrimiento y agregar las aletas de agitación, todos estos cambios requeridos por la norma (Figura 15(d)).

**2.1.3. Realización de inventario de los elementos del equipo:** Se creó una lista de chequeo con los elementos del equipo de desgaste abrasivo “rueda de caucho y arena seca”, en la Tabla 3., se clasificaron los elementos a eliminar, cambiar o efectuar mantenimiento, esto se hizo para que el nuevo tribómetro cumpliera con las normas ASTM G65 y ASTM G105 a cabalidad, contando con la aplicación de un control de proceso automatizado.

**2.1.4. Selección de los componentes para la automatización del equipo de desgaste abrasivo:** En la Tabla 4 se detalla la selección de los componentes y elementos de control, acorde con la tecnología actualizada en la automatización de sistema de control.

**2.1.5. Realización de un modelo CAD del equipo:** A partir del software SolidWorks, se llevó a cabo el levantamiento del plano del equipo con sus materiales metalmecánicos, elementos de control y su posterior ensamble.

**2.1.6. Simulaciones:** Mediante el software SolidWorks, se utilizó el módulo de simulaciones estáticas de las cuales se llevaron al cabo varias. Esto con el fin de verificar en los componentes más críticos de la máquina sus cargas permisibles, y validar las deformaciones, las cargas, energía de distorsión y cuánto es el factor de seguridad de los componentes más críticos del equipo.

**Tabla 3.** Lista de chequeo del tribómetro arena seca y rueda de caucho.

ELEMENTOS DEL EQUIPO	¿SIRVE PARA EL NUEVO TRIBÓMETRO AUTOMATIZADO?		OBSERVACIÓN
	SÍ	NO	
Estructura metálica en tubería cuadrada de 40 mm		X	Se cambió por una nueva estructura en tubería de 50 mm.



Cubierta metálica		X	Se cambió por una nueva cubierta metálica y acrílica.
Puertas		X	Se cambió por una nueva puerta metálica y acrílica.
Tolva de arena		X	Se cambió por una tolva nueva, con un diseño diferente.
Motor trifásico y ventilador	X		Buen estado.
Variador de Velocidad		X	No es compatible con el PLC.
Contador de vueltas	X		Es compatible con el PLC.
Sensor de proximidad	X		Es compatible con el PLC.
Chumaceras		X	Se cambiaron por unas nuevas.
Eje para ruedas de caucho	X		Buen estado.
Boquilla para arena		X	Se cambió por una boquilla nueva con un diseño diferente.
Brazo		X	No es compatible con el PLC.
Contrapeso		X	No es compatible con el PLC.
Porta probeta		X	No es compatible con el PLC.
Ruedas de caucho (5)	X		Se modificaron 3 ruedas en el diámetro y recubrimiento para que fueran compatible con la norma ASTM G105.

**Tabla 4.** Lista de elementos del sistema de control.

ELEMENTOS DEL SISTEMA DE CONTROL	OBSERVACIÓN
Pantalla HMI integrada con PLC	Permite controlar y visualizar todos los elementos de control que están ligados al sistema.
Variador de velocidad	Permite un control preciso y eficaz del motor, desde la interfaz del HMI integrado con el PLC.
Fuente de voltaje	Suministra un voltaje constante a todo el circuito del sistema de control.
Cilindro neumático	Reemplaza la función del brazo y del contrapeso del equipo anterior. Usa la fuerza del aire comprimido para extenderse y presionar la probeta contra la rueda de caucho.
Actuadores neumáticos y válvulas electroneumáticas.	Permiten la apertura y cierre del agente abrasivo para el caso de la norma ASTM G-65 y del agua para el caso ASTM G105 respectivamente.
Unidad de mantenimiento /Filtro	Realiza tres funciones básicas: regular la presión, filtrar y lubricar el aire.
Convertidor I/P	Transforma la señal eléctrica en señal neumática para usar con equipos neumáticos o accionadores de válvula.
Compresor	Permite obtener la presión necesaria, para que el cilindro neumático mantenga la probeta en el disco durante el proceso de desgaste, así como también, brinda el aire necesario para accionar los actuadores rotativos.

### 2.1.7. Realización de los cálculos de diseño

Se efectuaron cálculos para determinar la potencia requerida para los diferentes ensayos, con base a los resultados, se estableció que el motor existente cumplía con todas las características necesarias para la ejecución de las pruebas, además se realizaron cálculos de diseño para conocer el tamaño y forma adecuada para las tolvas de arena y agua, así como el contenedor de la norma ASTM G105.



### 2.1.8. Selección de materiales

Con base al inventario del equipo anterior y a los resultados que se obtuvieron en la etapa de diseño y las simulaciones, se seleccionaron los materiales para construir un equipo de ensayos de desgaste abrasivo lo más confiable posible.

## 2.2. Construcción del equipo

### 2.2.1. Desarme del equipo

Se realizó el desarme del tribómetro antiguo para la reutilización de algunos de sus accesorios (Figura 16), los elementos para el nuevo tribómetro son:

- 1 motor trifásico de 1HP marca WEG W22.
- 1 eje mecanizado de acero 4140.
- Láminas de acero galvanizado.



**Figura 16.** Desarme del tribómetro rueda de caucho y arena seca [Autor].

### 2.2.2. Compra de materiales y equipos

Posterior a la selección de todos los materiales necesarios para la construcción del equipo, se cotizaron con los diferentes proveedores para conocer la disponibilidad, costos y se procedió a la compra de estos.

### 2.2.3. Fabricación de los elementos del equipo mediante maquinado

Para cumplir con el adecuado funcionamiento del equipo, algunos de los componentes se diseñaron con una variedad de forma y tamaño, los cuales no se encontraban en el mercado, razón por la cual, fue necesaria su fabricación mediante diferentes procesos de manufactura.

### 2.2.4. Ensamble del equipo

El montaje del equipo se hizo por medio de uniones rígidas y desmontables. Las uniones desmontables se utilizaron con el fin de que el equipo cuente con piezas intercambiables y pueda cumplir con los parámetros de las normas ASTM G65 y ASTM G105, adicional a esto, se realizó el montaje según las normativas el ensamble de los elementos de control y los elementos tribológicos.

### 2.3. Programación e implementación del ciclo de automatización del equipo

El sistema de control se enfocó hacia las diferentes variables que genera él mismo, dentro de estas se encuentran el flujo de arena y de agua (dependiendo de la norma), la velocidad de giro apropiado del motor, la carga aplicada en la probeta contra el disco durante el ensayo, entre otras nuevas características manejadas a través de un PLC debidamente posicionado en el equipo.

### 2.4. Verificación del funcionamiento del equipo

#### 2.4.1. Preparación de probetas

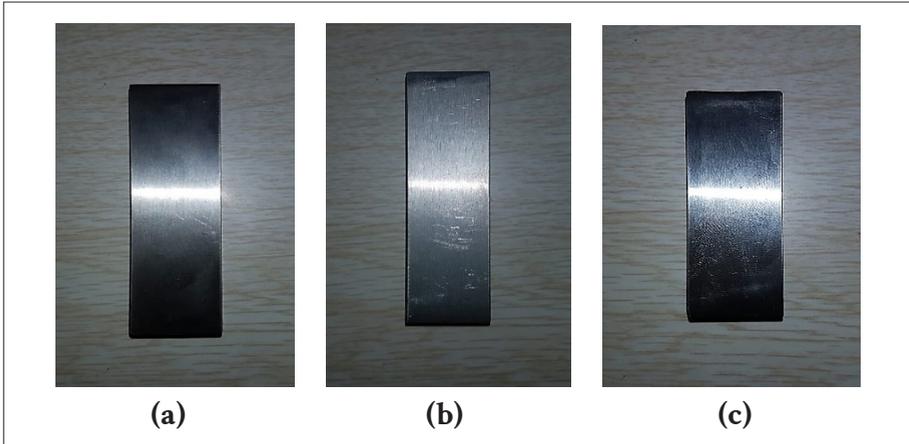
Para adelantar las pruebas en el tribómetro de desgaste según las normas ASTM G65 y ASTM G105, se puede disponer de cualquier tipo de materiales metálicos que posean diferentes durezas. En este caso, para validar el equipo, se utilizaron tres materiales que fueron sometidos a diferentes procedimientos según su dureza y resistencia a la abrasión; así como también, se evaluó que los especímenes tuvieran las medidas correspondientes a su norma y que están soportados en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Dimensiones de las probetas utilizadas en este trabajo.

Material	Norma de desgaste	Ancho (mm)	Largo (mm)	Espesor (mm)
Acero inoxidable	ASTM G-65	25.4	76.2	3.2 - 12.7
Aluminio	ASTM G-65	25.4	76.2	3.2 - 12.7
Acero 4140	ASTM G-105	25.4	57.2	6.4 - 15.9



Para la preparación de las probetas, se utilizaron máquinas convencionales y de control numérico computarizado (CNC) para desbastar el material y darle el acabado superficial requerido (Figura 17).



**Figura 17.** (a) Probeta de acero inoxidable martensítico AISI 403; (b) Probeta de aluminio; (c) Acero AISI 4140.

### 2.4.2. Parámetros de prueba

El desarrollo de las pruebas según la norma ASTM G-65, describe dos procedimientos de pruebas (B y E) y la norma ASTM G105, refiere un solo procedimiento, en donde se efectúan 4 ensayos con diferentes discos. Estos parámetros están descritos en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Parámetros de prueba.

Procedimiento	Fuerza aplicada (N)	Revoluciones (rev)	Velocidad (RPM)	Abrasión lineal (m)
B	130	2000	200	1436
E	130	1000	200	718
Ensayos 1,2,3,4	222	1000	245	558

### 2.4.3 Preparación de la máquina

Se realizaron los ajustes para la preparación de la máquina con los elementos de desgaste pertenecientes a las normas ASTM G65 y ASTM G105. En el caso de la ASTM G65, se tiene en consideración un disco de

228.6 mm de diámetro y la porta probetas G65 para ajustar la muestra con las medidas de la norma y hacer el proceso con la arena seca (Figura 18a). Para la ASTM G105, se tienen configurados elementos como el disco de 177.8 mm de diámetro, la porta probetas G105 para asegurar la muestra durante el proceso y el contenedor de la mezcla para presentar el desgaste con la arena húmeda (Figura 18b).



**Figura 18.** (a) Montaje completo de los elementos G65; (b) Montaje completo de los elementos G105.

#### 2.4.4. Ajuste de programación

En la pantalla del PLC, se programó el tipo de norma y las respectivas variables del proceso de desgaste. La ASTM G65, posee 5 procedimientos, cada uno tiene sus parámetros establecidos y dictados por la norma (Figura 19a), se eligió el procedimiento correspondiente a el tipo de material que va a ser objeto de estudio, alineado a las características de los alcances de esta norma. La ASTM G105, tiene 4 ensayos, todos con los mismos parámetros establecidos y dictados por la norma, la diferencia es, que, en cada ensayo se utilizó un disco de dureza diferente, los dos primeros ensayos se adelantaron con el mismo disco de dureza Shore A50, el ensayo 3 se ejecutó con un disco de dureza Shore A60 y, finalmente, el ensayo 4 se realizó con un disco de dureza Shore A70 (Figura 19b).



Figura 19. (a) Pantalla de la norma G65; (b) Pantalla de la norma ASTM G105.

## 2.4.5. Ejecución de las pruebas experimentales

Se cumplieron diferentes pruebas técnicas mediante la verificación de las normas ASTM G65 y ASTM G105, para realizar la puesta en marcha involucrando todos los factores que se relacionaron de manera directa con el proyecto.





## 3. Resultados y análisis

---

### 3.1 Diseño conceptual

Para el diseño de equipos de desgaste abrasivo, es necesario considerar métodos de prueba basados en normas y especificaciones; la ASTM, cuenta con normas para las pruebas de desgaste, describe métodos de prueba para determinar la resistencia al desgaste de materiales metálicos a través de pruebas de laboratorio. ASTM, estableció métodos para clasificar los materiales según su resistencia al desgaste bajo un conjunto específico de condiciones. Por lo tanto, el diseño de los elementos del equipo se basa en los siguientes criterios:

- ASTM G65 para desgaste de bajo esfuerzo [21].
- ASTM G105 para desgaste de bajo y alto esfuerzo [22].

En estas normas se aprecian con detalle los pasos reglamentarios y las medidas necesarias para obtener inicialmente un bosquejo general de la máquina; y así, es posible identificar aquellos aspectos que se encuentran parametrizados y caracterizados de forma específica, de tal manera, que no se le puedan realizar modificaciones durante el proceso de diseño. En este caso, los elementos que están definitivos por las normas para el funcionamiento del equipo son:

- Discos de acero
- Fuerza ejercida sobre las probetas
- Material abrasivo
- Boquilla dosificadora de material abrasivo
- Potencia y velocidad angular del disco abrasivo
- Posición de la probeta

A la luz de lo anterior, el proceso de diseño, consiste en proponer soluciones que permitan la integración de equipos de prueba, que, incorporen todos los parámetros restringidos y garanticen condiciones ideales para la realización de pruebas de desgaste. La máquina anterior, sólo cumplía con la norma ASTM G65, por ello, el diseño estructural debió ser modificado

para incluir la norma ASTM G105, lo cual implica la fabricación de una nueva estructura, nuevas tolvas y la adición de elementos eléctricos y de control neumático.

### 3.1.1. Componentes y materiales

Las normas proporcionan descripciones detalladas para algunos de los componentes principales de los equipos de prueba de desgaste, los que corresponden a elementos que no se modifican fácilmente y, por lo tanto, pasan directamente a la fabricación. Por otra parte, se tienen elementos complementarios al funcionamiento del dispositivo, referente a la parte de la automatización, los cuales admiten un grado de selección en diferentes alternativas para su utilización y que no se describen en las normas.

#### 3.1.1.1. Estructura

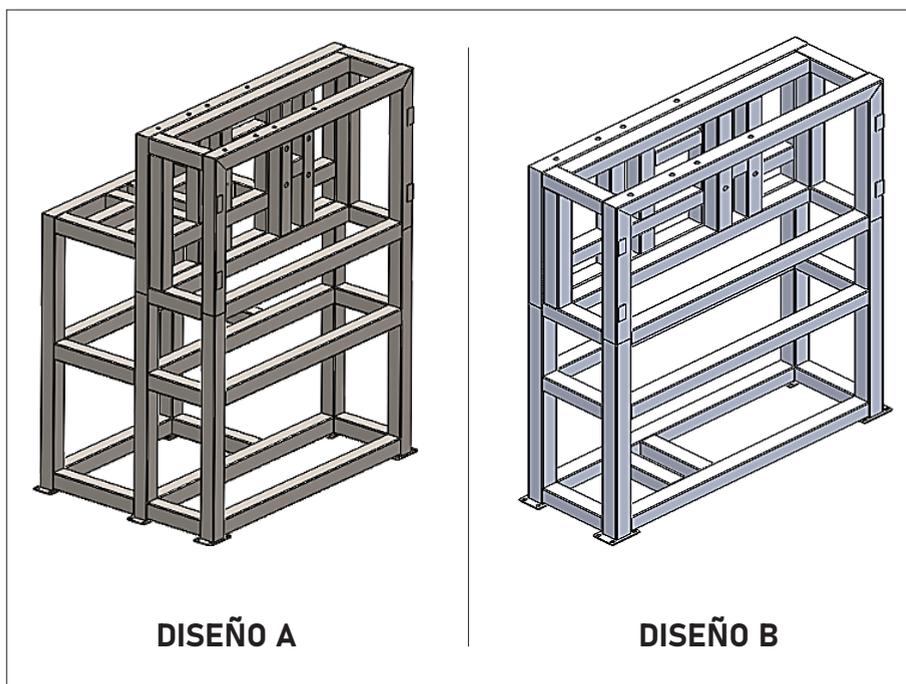
Se buscó crear una nueva estructura lo más reforzada posible, utilizando materiales de calidad que proporcionen la estabilidad necesaria al equipo en el momento de hacer las pruebas de las normas ASTM G65 y ASTM G105. En la Figura 20., se presentan dos alternativas para el diseño estructural con el propósito de establecer los aspectos esenciales con los que debe contar la máquina. Los criterios para la selección fueron:

- El espacio que ocuparía la máquina: Teniendo en cuenta su ubicación en una zona determinada del laboratorio CELTI.
- Estabilidad del motor: Para realizar las pruebas, es de vital importancia que el motor no presente vibraciones, esto conllevaría a errores en los resultados obtenidos.
- Peso de la máquina: Para su traslado a diferentes puntos del taller CELTI.

Se asignó un puntaje de 1 a 5, siendo 1 muy desfavorable y 5 muy favorable (Tabla 7).

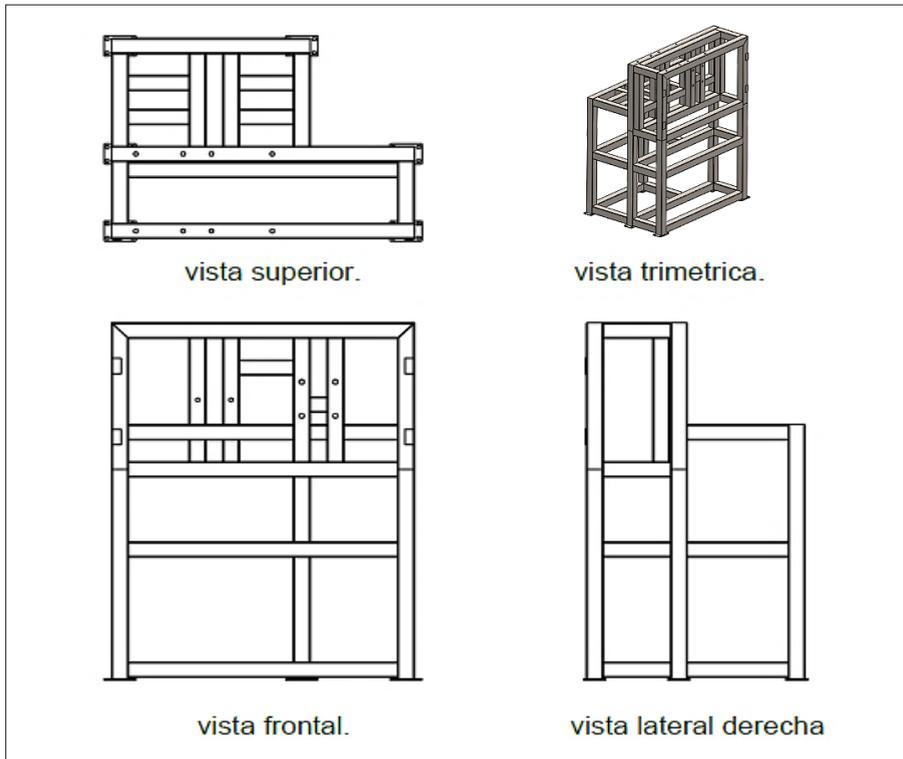
**Tabla 7.** Criterios para la selección de la estructura.

Estructura	Espacio ocupado (30%)	Estabilidad del motor (50%)	Peso de la máquina (20%)
Diseño A	3	5	3
Diseño B	5	3	4



**Figura 20.** Propuestas de diseño [Autor].

La estructura A tuvo una puntuación final de 4. La estructura B obtuvo 3.8. Por lo cual, se optó por implementar la estructura A. La Figura 21., deja ver el resultado del diseño contemplado, en el que se utilizó como material estructural una tubería cuadrada, de acero ASTM A36, con dimensiones de 50x50x2 mm; todo el material fue seleccionado bajo consideraciones relevantes como: costo, factor de seguridad y soporte de carga. Se mantuvo el mismo diseño estructural en cuanto a la ubicación del motor en la parte posterior, ya que proporciona una mayor estabilidad y excelente distribución entre espacio y peso de la máquina; de esta manera, se mantiene el motor acoplado directamente sin la necesidad de contar con elementos de transmisión tales como cajas de engranajes, correas de transmisión o reductores; por tanto, no se presentará ningún tipo de desgaste mecánico, lo que resulta en una excelente fiabilidad y en un largo tiempo de vida.



**Figura 21.** Vistas de la estructura diseñada.

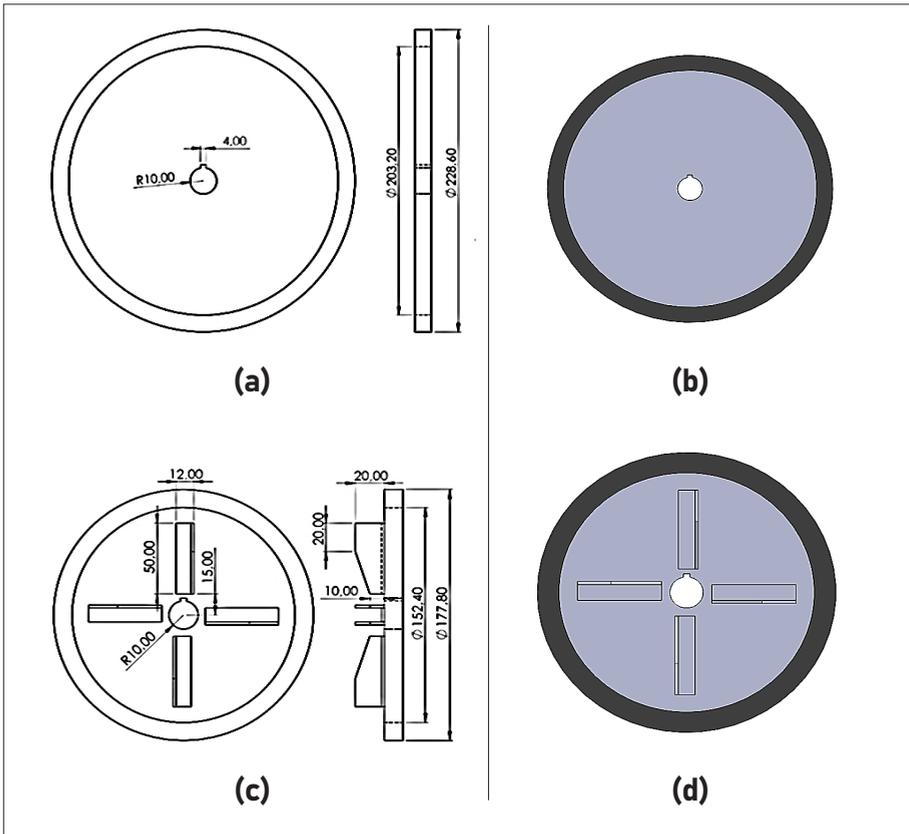
Se debe recordar, que, una menor cantidad de piezas mecánicas minimiza el mantenimiento y reduce los costos del sistema, por lo que la tecnología de transmisión directa inherente a los sistemas de motores de torque permite un ensamblaje sin transmisión eficiente y efectivo.

**3.1.1.2. Discos de acero para el desgaste:** Este equipo se basó en 2 normas, fue necesario desarrollar un tipo de disco para cada una, los cuales varían significativamente en el diámetro, la dureza del recubrimiento y en sus accesorios.

**3.1.1.2.1. Discos para la norma ASTM G65:** Están fabricados de acero AISI 1020, para las pruebas de desgaste se requiere que el caucho cuente con una dureza shore de A60 [21]. Además, se hizo un rediseño en la perforación ampliando su diámetro a 20mm y se mecanizó un chavetero de 4mm (Figura 22a y 22b).



**3.1.1.2.2. Discos para la norma ASTM G105:** Están fabricados de acero AISI 1020, se mecanizó su diámetro a la medida de la norma, ya que se requieren tres discos y el caucho de cada disco debe tener una dureza Shore diferente, respectivamente de A50, A60 y A70 [22] y se adicionaron 4 paletas de acero galvanizado a cada disco para una mayor agitación en la mezcla (Figura 22c y 22d).



**Figura 22.** (a) Plano del disco ASTM G65 [20]; (b) Diseño del disco ASTM G65 [20]; (c) Plano de disco ASTM G105 [22]; (d) Diseño del disco ASTM G105 [22].

### 3.1.1.3. Difusor de arena

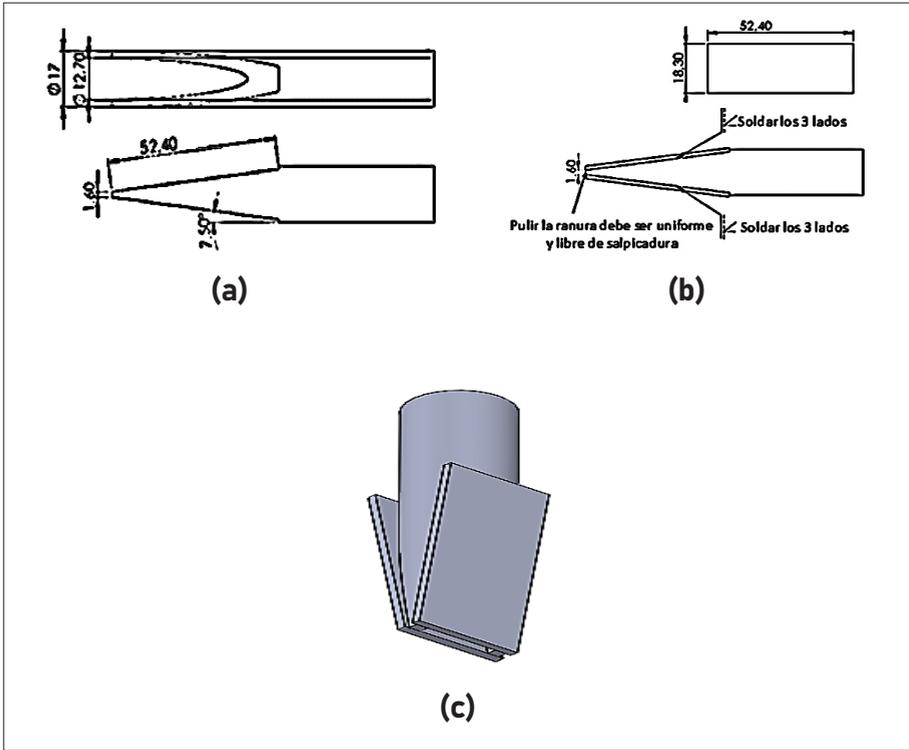
La norma ASTM G65, muestra el diseño de la boquilla que se desarrolló, con el fin de obtener un caudal de arena preciso, y su forma rectangular crea una cortina de arena de forma correcta para los procedimientos de

prueba, la boquilla en este caso, tendrá la longitud necesaria que permita la conexión a un tubo o manguera de plástico o cualquier otro material de alta flexibilidad. El cual, a su vez está conectado a la válvula de  $\frac{3}{4}$  NPT controlado por el actuador neumático de control, quien sistemáticamente libera el agente abrasivo que viene del contenedor. En la boquilla nueva (Figura 23c), la tasa de flujo de la arena se ajustó puliendo el orificio de la boquilla, para aumentar el ancho de la abertura con el propósito de desarrollar un flujo de arena de 300 a 400 g / min. La norma nos informa que, las boquillas hechas a partir de tubos y chapas metálicas, duplican el tamaño y las características del flujo de arena de la boquilla fabricada. Para la construcción de la boquilla, se siguieron los pasos establecidos por la norma ASTM G65 [21].

1. Tubería inoxidable diámetro  $3/8$ " es calibre 40 o equivalente en sistema métrico, con diámetro exterior de 17 mm y diámetro interior de 12.4 mm. Se debe cortar el tamaño requerido (Figura 23a).
2. Se debe maquinar el diámetro interior hasta 12.7 mm.
3. El fresado de  $7.9^\circ$  en el diámetro exterior de forma cónica para obtener una superficie plana dejando de tamaño  $2$ " desde el extremo trasero hasta el inicio del cono (Figura 23a).
4. Platina de acero inoxidable calibre 16 o el calibre equivalente en el sistema métrico. Con espesor de 1.59 mm, maquinar el tamaño y espesor (Figura 23b).
5. Soldar la superficie plana del ítem 2 a la superficie cónica del ítem 1. (Figura 23b).
6. Pulir el extremo del difusor para obtener una anchura de ranura de 1.59 mm.
7. Determina el caudal del difusor usando arena AFS 50/70 (300 a 400 g/min).
8. Para aumentar el caudal vuelve a pulir el extremo del difusor en 0.10 mm.

#### **3.1.1.4. Agente abrasivo**

El abrasivo varía según el estándar aplicado (Tabla 8). En el que AFS, se refiere al tipo de arena utilizada como agente abrasivo según la American Foundry Society y 50/70 representa el rango del tamaño del gran (-50/+70 verificado en mallas) (Tabla 9).



**Figura 23.** (a) Ítem 1: diámetro y forma cónica de la tubería [21]; (b) Ítem 2: platina y boquilla soldada [21]; (c) Representación de la boquilla de arena.

**Tabla 8.** Agentes abrasivos por norma [4,5].

NORMA	AGENTE ABRASIVO
ASTM G-65	AFS 50/70
ASTM G-105	AFS 50/70

En el desarrollo de las pruebas según norma ASTM G65, el contenido de humedad no debe ser superior a 0,5% en peso, y puede ser determinada por la medición de la pérdida de peso, después de calentar una muestra a aproximadamente 120 °C (250 °F) durante 1 h como mínimo [4]. En la implementación de la norma ASTM G105, las pruebas se realizarán en una mezcla 0,940 kg de agua desionizada y 1.50 kg de una arena AFS 50/70 [5].

- Agente abrasivo: es el reactivo que puede causar el desgaste en la muestra. Estos pueden ser arena seca según ASTM G65 [4], mezcla entre arena y agua [5], “slurry” para la norma ASTM G105.
- Mecanismo de desgaste: Está compuesto por el disco de desgaste y una fuerza aplicada.

**Tabla 9.** Tamaño de tamices necesarios para conseguir arena AFS 50/70 [4].

TAMAÑO DEL TAMIZ	APERTURA DE TAMIZ	% RETENIDO DE TAMIZ
40	425 $\mu\text{m}$	Ninguna
50	300 $\mu\text{m}$	5 máximo
70	212 $\mu\text{m}$	95 mínimo
100	150 $\mu\text{m}$	No pasa

### 3.1.1.5. Porta probetas

Al tratarse de un equipo automatizado, se decidió cambiar el brazo (especificado en la norma) por un cilindro neumático; para este referente, se diseñaron 2 porta probetas, uno para cada norma; su función como su nombre lo indica, es sostener la probeta, permitiendo que no se mueva durante el ensayo. La Figura 24., presenta el nuevo sistema de sujeción de las probetas que fue diseñado en SolidWorks y construido con base a los requerimientos de las normas ASTM G65 y ASTM G105, respectivamente, dado para que, las probetas con sus máximas dimensiones encajen perfectamente en la ranura. Este sistema está compuesto por un conector universal, este se encuentra anclado con el cilindro neumático, y es inamovible durante cualquiera de los procesos, el siguiente elemento, es el que va a sostener la probeta con una configuración diferente en las ranuras, ya que las probetas son de variadas medidas según las normas; además, estarán instaladas las celdas de carga; y por último, se tiene el elemento que va a apretar la probeta y dejarla totalmente sujeta por sus partes laterales cuando esté recibiendo la fuerza de rozamiento por parte del disco de caucho, y, para dar mayor seguridad de sujeción lo comprimimos por medio de tornillería.

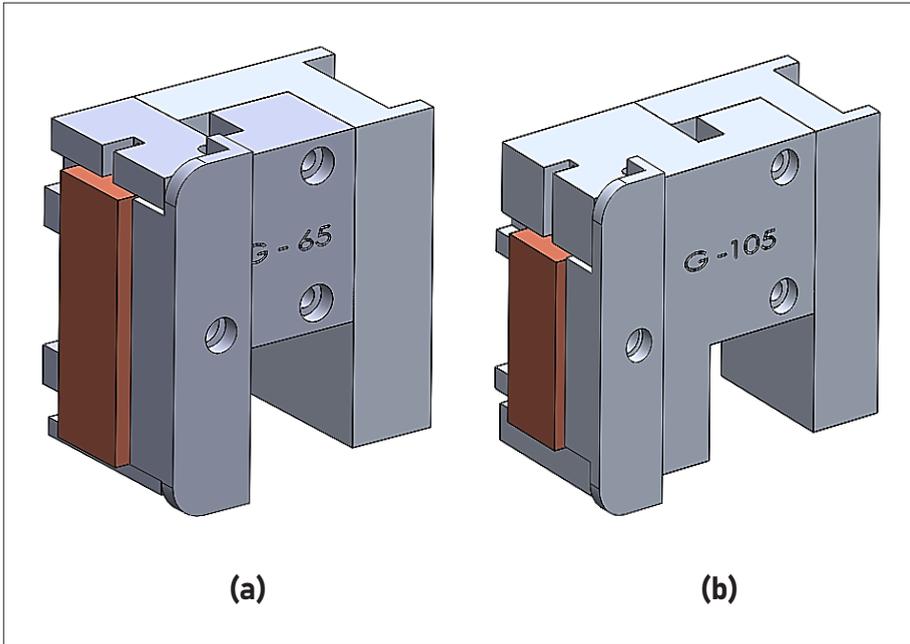
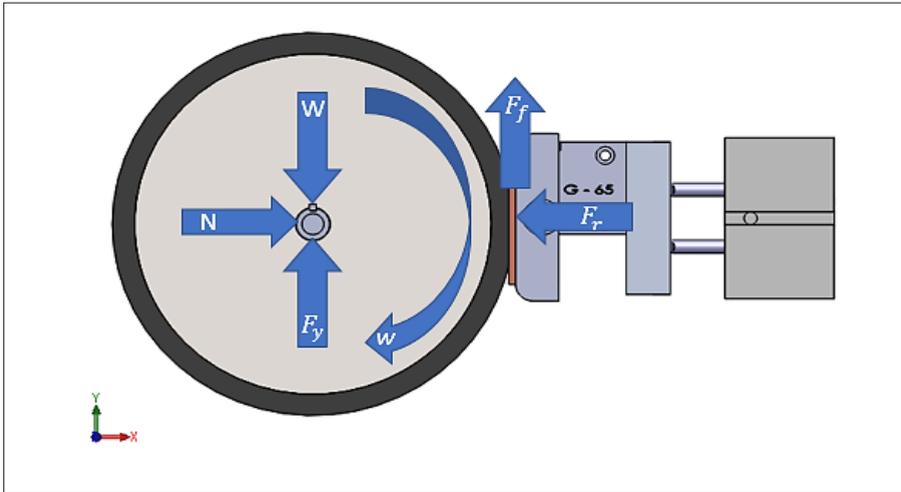


Figura 24. (a) Porta probeta G65; (b) Porta probeta G105.

## 3.2. Cálculos

### 3.2.1. Cálculo de la potencia requerida

Para determinar la potencia del motor, primero, se definen los componentes que actúan sobre este, en primera instancia, el cilindro neumático que aplica la máxima fuerza determinada por la norma a la porta probeta, las máximas RPM del motor, el tamaño del disco de desgaste y el sistema de sujeción de probetas para el desgaste de los materiales. Mediante el software de diseño SolidWorks, se obtuvo el diagrama de cuerpo libre (Figura 25) donde el disco estará en contacto contra una probeta que produce una fuerza de rozamiento, la misma que se debe vencer para poder generar un movimiento; para esto, fue necesario definir la constante de rozamiento dinámico y se optó por el valor procedente del contacto del caucho y el concreto seco por ser el más crítico y es el valor más próximo a nuestro proceso de evaluación de desgaste ( $\mu = 0.8$ ) [1].



**Figura 25.** Esquema de fuerzas.

Dónde,  $F_r$  es la fuerza de empuje resultante tomada de la norma ASTM G105 ( $F_r \cong 222\text{ N}$ ),  $F_f$  es la fuerza de fricción y  $N$  es la fuerza normal a la fuerza de empuje resultante, como se ve en la igualdad (3).

$$\sum F_x = 0$$

$$F_r - N = 0$$

$$N = F_r \text{ (3)}$$

$$N \cong 222\text{ N}$$

La ecuación (4) muestra que la fuerza de rozamiento va a estar determinada por su fuerza normal y su constante de rozamiento.

$$F_f = N * \mu \quad (\text{Ec 4})$$

$$F_f = 222\text{ N} * 0.8$$

$$F_f = 177.6\text{ N}$$



La fuerza de rozamiento es tangencial al movimiento del disco por lo que para la siguiente ecuación (5),  $F_f$  equivale a  $F$ .

$$P = T * w$$

$$P = F * r * w \quad (\text{Ec 5})$$

Donde,  $P$  es la potencia,  $F$  es la fuerza máxima y donde: ( $F \cong F_f \cong 177.6 \text{ N}$ ),  $r$  es el radio del disco con mayor fuerza que en este caso es el disco de la norma ASTM G105 el cual tiene un diámetro de: ( $\phi = 177.80 \text{ mm}$ ), por lo que su radio resulta en ( $r = 88.9 \text{ mm}$ ) y  $w$  es la velocidad angular máxima que es de: ( $w = 245 \text{ rpm}$ ). Aunque primero se hacen los cambios de unidades del radio en metros.

$$r = 88.9 \text{ mm}$$

$$88.9 \text{ mm} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}}$$

$$r = 0.0889 \text{ m}$$

Después se procedió a determinar las unidades de la velocidad angular en rad/s.

$$w = 245 \text{ rpm}$$

$$245 \text{ rpm} * \frac{\pi}{30}$$

$$w = 25.64 \text{ rad/s}$$

Y por último se procedió a determinar la potencia con las unidades correspondientes.

$$P = 177.6 \text{ N} * 0.0889 \text{ m} * 25.64 \text{ rad/s}$$

$$P \cong 404.82 \text{ W}$$

$$HP = \frac{404.82 \text{ W}}{746}$$

$$P \cong 0.54 \text{ HP}$$

Por lo tanto, se obtuvo una potencia ( $P = 404.82 \text{ W}$ ) y según la norma ASTM G105, la potencia recomendada es de  $750 \text{ W}$ . El valor obtenido es un valor referencial para compararlo con el que está establecido en la norma. El motor utilizado es de  $1 \text{ HP}$ , por lo que estará trabajando a media capacidad. Es evidente que existe una variación entre el valor obtenido y el establecido en la norma; pero, sigue siendo ideal para cualquiera de los procesos de desgaste que se trabajan en esta máquina.

### 3.2.2. Cálculo y diseño de la tolva de arena para la norma ASTM G65

La tolva se diseñó con el propósito de contener la cantidad de arena adecuada para realizar todos los procedimientos de la norma una sola vez, sin la necesidad de volver a llenarla, para el caso de la tolva de arena, perteneciente a la norma G-65, se tiene un volumen total para la máquina, dado por la ecuación:

$$V = \frac{\dot{m}_{max} * T}{\rho_{arena}} \quad (\text{Ec } 6)$$

Dónde,  $V$  es el volumen,  $\dot{m}_{max}$  es el flujo másico máximo por prueba,  $T$  es el tiempo total de los procedimientos a, b, c, d y e respectivamente, y  $\rho_{arena}$  obviamente es la densidad de la arena de prueba, la cual fue suministrada por el proveedor:

$$\dot{m}_{max} = 400 \text{ g/min}$$

$$T = 30 + 10 + 0.5 + 30 + 5 = 75.5 \text{ min}$$

$$\rho_{arena} = 1600 \text{ g/L}$$

$$V = \frac{400 \frac{\text{g}}{\text{min}}}{1600 \text{ g/L}} * 75.5 \text{ min}$$

$$V = 18.9 \text{ L}$$

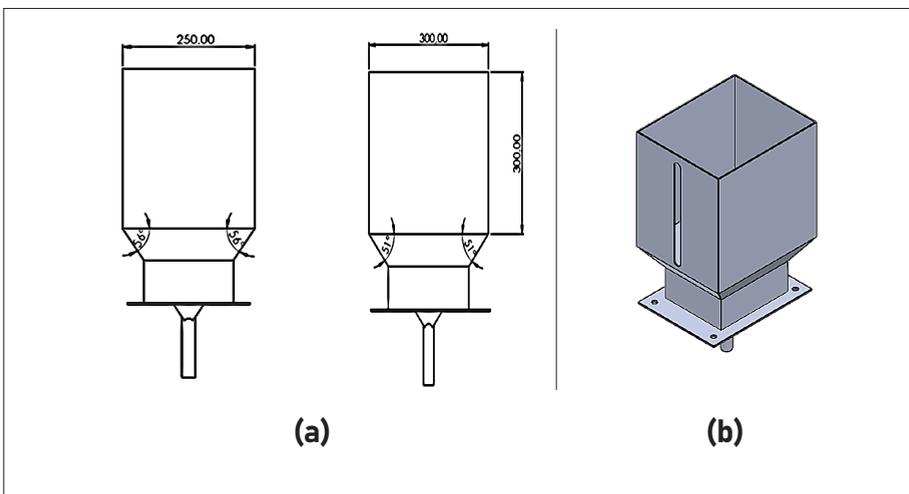


El volumen generado de 18.9 L es suficiente para todos los procedimientos juntos una vez, ya que el factor multiplicador por temas de seguridad para contenedores de este tipo se encuentra en el orden de 1 a 2, buscando ser conservadores, se seleccionó un factor multiplicador de 1.42, lo cual generó un volumen de 27 L.

$$V = 18.9 L * 1.42$$

$$V = 26.838 L \approx 27 L$$

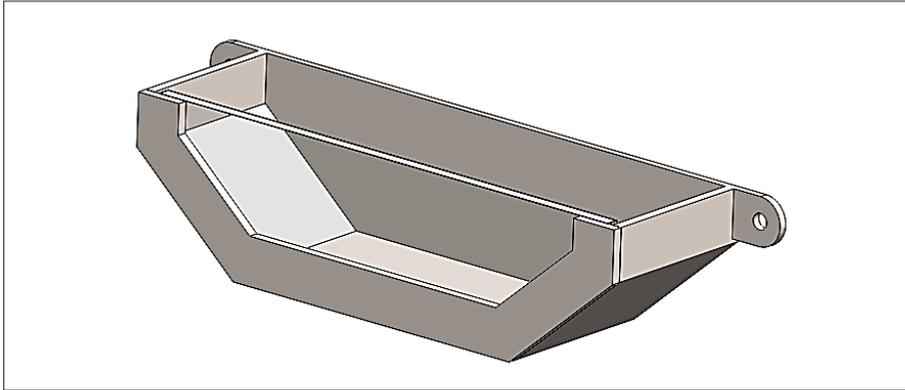
Con este volumen establecido se calculó la altura del contenedor en 298.33 mm, este resultado se aproximó a 300 mm, para tener una mayor seguridad y un mejor confort en el diseño, en general, del contenedor, y se puede apreciar en el nuevo diseño, el cual en la parte piramidal de la tolva en su vista frontal tiene ángulos de  $56^\circ$  y en la vista lateral tiene ángulos de  $51^\circ$ . Cabe decir, que, muchas de las medidas para estas tolvas se tomaron en consideración a los cálculos de la máquina desarrollada por Romo Ochoa [11], por lo que se confirmaron todos los cálculos proporcionados que nos generan el volumen suficiente que debe tener el contenedor para nuestro proceso de desgaste de la norma G65. Se puede observar la imagen desarrollada en SolidWorks en la Figura 26.



**Figura 26.** (a) Dimensiones de la tolva; (b) Diseño final de la tolva de arena.

### 3.2.3. Cálculo y diseño de la tolva de agua para la norma ASTM G105

Se diseñó de la misma forma que la ASTM G65 a diferencia de que las medidas son más reducidas, ya que, su volumen está relacionado directamente con la cantidad que se requiere en el contenedor de la mezcla Figura 27.



**Figura 27.** Contenedor de la mezcla de la norma ASTM G105.

Según la norma, la cámara debe contener 940 gramos de agua [22]. Esta máquina se modificó con el objetivo de presentar como máximo 15 pruebas seguidas de esta norma, debido a que el factor multiplicador por temas de seguridad para contenedores de este tipo de tanque se encuentra en el orden de 1 a 2, por conservación, se seleccionó un factor multiplicador de 1.42, lo que generó un volumen para la tolva de agua de aproximadamente 20 L.

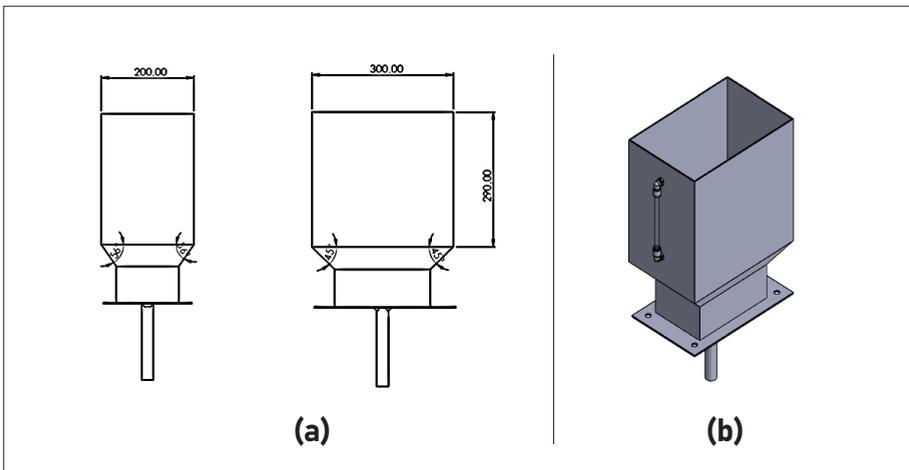
$$940 \text{ gramos} * \frac{0.001 \text{ Litros}}{1 \text{ gramo}} = 0.94 \text{ Litros}$$

$$V = 0.94 \text{ L} * 1.42 * 15$$

$$V = 20 \text{ L}$$



Con este volumen establecido, se calculó la altura del contenedor de agua que fue de 284 mm, este resultado se aproximó a 290 mm, para tener una mayor seguridad y un mejor confort en el diseño en general. Igualmente, se adicionaron uniones soldadas de  $\frac{1}{4}$ " de diámetro para colocar los racores y el respectivo nivel de agua, que se puede apreciar en el nuevo diseño Figura 28b. En este caso, la parte piramidal de la tolva en su vista frontal, tiene ángulos de  $56^\circ$  y en la vista lateral tiene ángulos de  $45^\circ$  (Figura 28a). Por medio de SolidWorks, se detalló cómo quedaría el diseño del contenedor de agua, en donde se tiene una estructura soldada a la parte piramidal para darle soporte y rigidez al contenedor, y de esa forma mantenga una posición fija durante los diferentes procedimientos de desgaste que se lleven a cabo.



**Figura 28.** (a) Dimensiones de la tolva; (b) Diseño final tolva de agua.

### 3.2.4. Cálculos de la fuerza del cilindro neumático.

Una de las modificaciones a la máquina que se consideró, tiene que ver con la transmisión de la fuerza que aplica la probeta sobre las ruedas de caucho. El nuevo sistema consta de un solo cilindro, cuyo funcionamiento dependerá del circuito neumático utilizado. La fuerza producida por el cilindro está en función del diámetro del pistón, la presión de suministro de aire y la resistencia debida a la fricción, el dato suministrado por el fabricante es el diámetro del émbolo que es de 25 mm o en su defecto 0,025 m.

La conversión de *psi* a  $N/m^2$  para usar en la ecuación (7)

$$1 \text{ psi} \times \frac{101325 \frac{N}{m^2}}{14,7 \text{ psi}}$$

$$P = \frac{F}{A} \quad (\text{Ec } 7)$$

*P*: presión que maneja el sistema

*F*: fuerza del cilindro

*A*: área del cilindro;  $\frac{\pi}{4} D^2$

De la ecuación (7) se despeja a *F*;

$$F = P.A$$

$$F = (\text{Presión psi}) \left( \frac{101325 \frac{N}{m^2}}{14,7 \text{ psi}} \right) * \frac{\pi}{4} (0.025m)^2$$

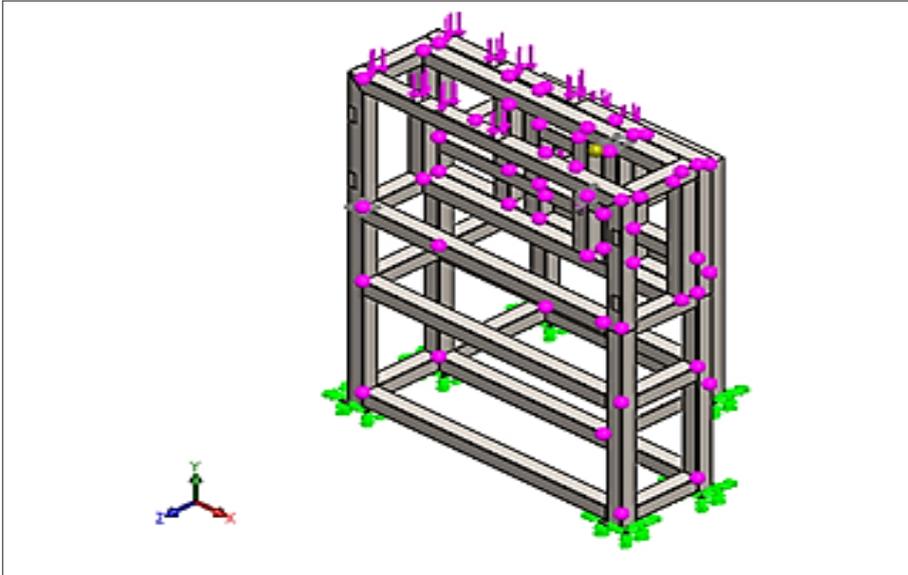
$$F = (\text{Presión psi}) \frac{63,328 \pi}{58,8} (N)$$

La ecuación (7) queda en términos de presión para reemplazarse y hallar la fuerza.

### 3.3. Simulaciones de los componentes críticos

#### 3.3.1. Simulación de la estructura

Para la simulación de la estructura se contó con los materiales, el peso de los componentes, y todo tipo de carga que se pudiera aplicar sobre el elemento (Figura 29).



**Figura 29.** Simulación de la estructura.

**Tabla 10.** Propiedades del material de la estructura [SolidWorks].

PROPIEDADES DEL MATERIAL	
Nombre	Acero ASTM A36
Tipo de modelo	Isotrópico elástico
Criterio de error predeterminado	Tensión de von Mises máx.
Límite elástico	$2,5 \times 10^8 \text{ N/m}^2$
Límite de tracción	$4,0 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Módulo elástico	$2,0 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Coefficiente de Poisson	0,26
Densidad	$7,850 \text{ Kg/m}^3$
Módulo cortante	$7,93 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$

Se usó el material detallado en la Tabla 10., para simular las fuerzas en Newton, debido al peso de los elementos en los diferentes puntos de la estructura (Tabla 11). El contacto del tribómetro con el piso ocurre en los 6 puntos mostrados en la Figura 30., en donde se encuentran unas planchuelas para llantas del equipo, lo cual genera unas fuerzas resultantes.

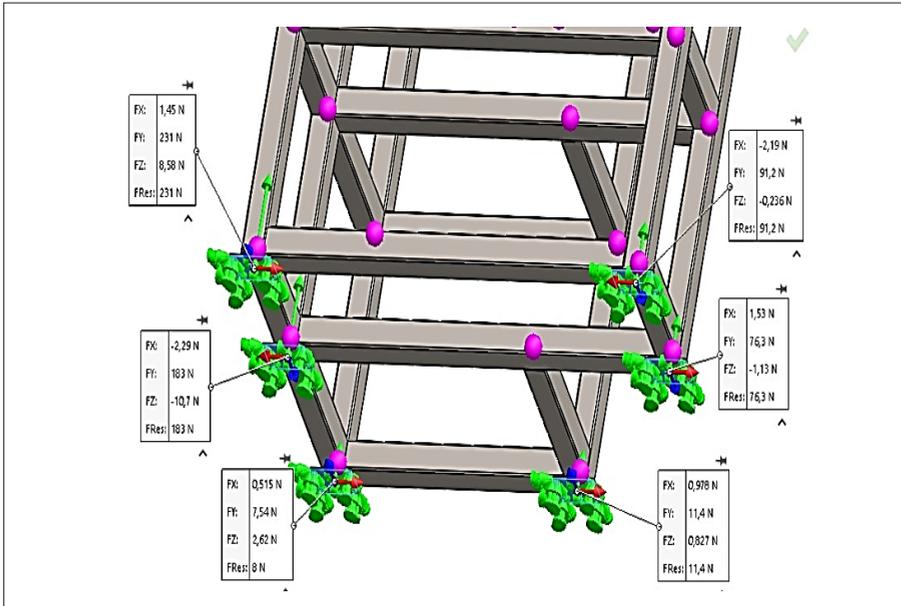
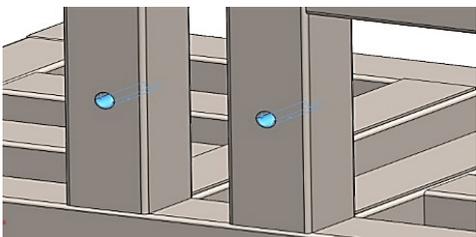


Figura 30. Fuerzas resultantes.

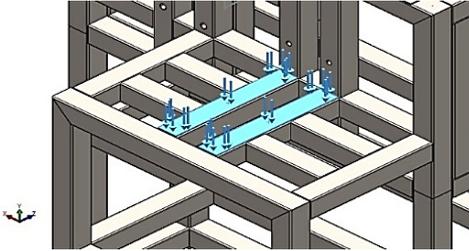
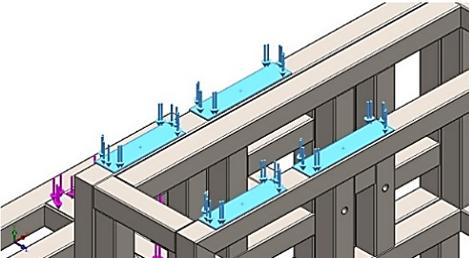
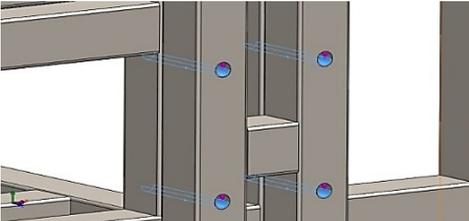
Para realizar la simulación, se trató de ser lo más realista posible y tratar de introducir todas las fuerzas externas que puedan presentarse como se aprecia en la Tabla 11. Al ejecutar la simulación con los datos de entrada expuestos anteriormente, se obtienen los siguientes valores de salida:

- **Mallado:** Para el análisis de elementos finitos, se desarrolló una malla, la cual está estipulada, por la cantidad de número de elementos (19.913) y números de nodos (43.414) (Figura 31a).

Tabla 11. Fuerzas ejercidas sobre la estructura.

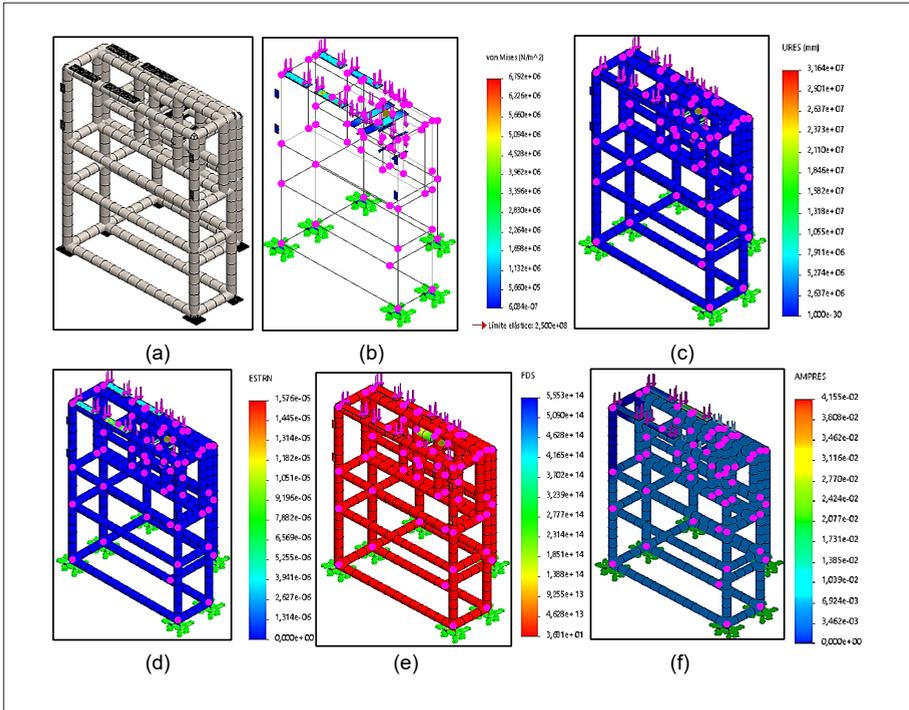
NOMBRE DE CARGA	IMAGEN	DETALLES DE CARGA
$F_A$ (Peso de las chumaceras, eje y el disco).		La fuerza esta aplicada sobre las dos perforaciones realizadas en la estructura, y que reciben la fuerza de 54,635 N en el sentido negativo del eje Y.



$F_B$ (Peso del motor)		La fuerza esta aplicada sobre las dos caras de la estructura sobre las cuales descansa el motor, y que reciben una fuerza de 50N en el sentido negativo del eje Y.
$F_C$ (Peso de las tolvas)		La fuerza esta aplicada sobre las dos caras de la estructura sobre las cuales descansa las 2 tolvas y que reciben una fuerza de 600N en el sentido negativo del eje Y.
$F_D$ (Peso de la placa soporte, cilindro y porta probeta).		La fuerza esta aplicada sobre la perforación realizada en la estructura, y que reciben la fuerza de 4,840 N en el sentido negativo del eje Y.

- **Tensión de von mises:** Es una magnitud física proporcional a la energía de distorsión; en ingeniería estructural, se usa en el contexto de las teorías de fallo como indicador de un buen diseño para materiales dúctiles; en este estudio, se obtuvo un valor mínimo de  $6,084 \times 10^{-7} \text{ N/m}^2$  y un máximo de  $6,972 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ , las tensiones de toda la estructura se pueden ver en la Figura 31., la cual nos ilustra por colores las zonas dentro de un rango de tensiones (Figura 31b).
- **Desplazamientos resultantes (URES):** Es la magnitud del vector  $\vec{u}$  o vector de desplazamientos, que esté compuesto por los movimientos en los tres ejes coordenados  $\vec{u}_x$ ,  $\vec{u}_y$  y  $\vec{u}_z$ . En este estudio se obtuvo un valor mínimo de  $1,000 \times 10^{-30} \text{ mm}$  y un máximo de  $3,164 \times 10^7 \text{ mm}$ . (Figura 31c).

- **Deformación unitaria equivalente:** Es el cambio en el tamaño o forma de un objeto debido a esfuerzos presentes sobre él, que está definido como el cambio de longitud con respecto a una longitud inicial, en este estudio tenemos se obtuvo el valor mínimo de 0 y un máximo de  $1,576 \times 10^{-5}$  (Figura 31d).
- **Factor de seguridad:** Indica la capacidad en exceso que tiene el sistema por sobre sus requerimientos; en este estudio, se obtuvo un valor mínimo de 3,681 y un máximo de  $5,553 \times 10^{14}$  (Figura 31e).
- **Pandeo:** Es conocido como la inestabilidad elástica, y se presenta en elementos que están siendo sometidos a carga de compresión y tienen formas esbeltas, y que se manifiesta por la aparición de deformaciones transversales a la dirección principal de compresión. La ocurrencia de pandeo, limita severamente la resistencia a la compresión de una columna o miembro alargado de cualquier tipo. En última instancia, a partir de un determinado valor de la carga de compresión axial, denominada carga crítica de pandeo, se produce inestabilidad elástica y luego la deformación tiende a aumentar, creando tensiones adicionales por encima de la tensión de fractura, provocando el colapso del elemento estructural. Además del pandeo por flexión ordinario, también existe el pandeo por torsión o inestabilidad elástica debido a un par excesivo. En este estudio, se obtuvo un valor mínimo de 0 y un máximo de  $4,155 \times 10^{14}$  (Figura 31f).



**Figura 31.** (a) Simulación del Mallado de la estructura; (b) Fuerzas resultantes en la estructura; (c) Desplazamientos resultantes en la estructura; (d) Deformación unitaria equivalente en la estructura; (e) Factor de seguridad en la estructura; (f) Estudio de pandeo en la estructura.

### 3.3.2. Simulación del eje

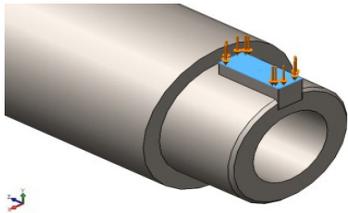
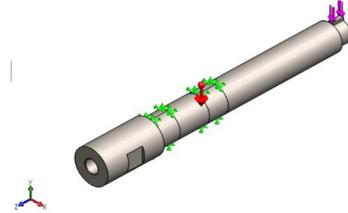
Según la información del equipo anterior, el material del eje es de AISI 4130 (Tabla 12), con base a sus propiedades, se suministraron los datos de entrada y salida para realizar la simulación correspondiente (Tabla 13).

**Tabla 12.** Propiedades del eje (AISI 4130) [SolidWorks].

PROPIEDADES DEL MATERIAL	
Nombre	Acero AISI 4130, normalizado a 870 °C
Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
Criterio de error predeterminado	Tensión de von Mises máx.
Límite elástico	$4,60 \times 10^8 \text{ N/m}^2$

Límite de tracción	$7,31 \times 10^8 \text{ N/m}^2$
Módulo elástico	$2,05 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Coefficiente de Poisson	0,285
Densidad	$7850 \text{ kg/m}^3$

**Tabla 13.** Fuerzas ejercidas sobre el eje.

NOMBRE DE CARGA	IMAGEN	DETALLES DE CARGA
$F_A$ (Fuerzas aplicadas por el disco)		La fuerza está aplicada sobre la cuña y recibe la fuerza de 30,63 N en el sentido negativo del eje Y.
Gravedad		La fuerza gravitacional de la tierra aplicada con referencia al plano planta con valor de 9,81N en el sentido negativo del eje Y.

### 3.4. Selección de materiales y equipos

Para la selección de materiales y equipos, lo primero que se consideró está registrado en la Tabla 3 (Lista de chequeo del tribómetro arena seca y rueda de caucho), en la cual se tienen los elementos del equipo anterior, en buen estado y compatible con el PLC, ellos son: Motor trifásico, contador de vueltas, sensor de proximidad, las chumaceras, las ruedas de caucho, y el eje. Para el resto de los elementos, se consultaron diferentes proveedores, técnicos y profesionales en el área. Con base a la información recopilada, se seleccionaron los siguientes materiales: para fabricar la estructura del equipo se utilizó una tubería estructural de acero ASTM A36 de (50x50x2,5) mm, láminas galvanizadas calibre 14 y 16 para fabricar los diferentes componentes como las tolvas, recubrimientos y contenedores, se utilizó lámina de acrílico de 5 mm de espesor para las puertas y



ventanas, en cuenta a los materiales, tornillería galvanizada y con tuerca y arandelas. En cuanto a los nuevos equipos para la automatización, se seleccionaron: pantalla HMI integrada con PLC, variador de velocidad, fuente de voltaje, actuador neumático integrado a una válvula rotativa, cilindro neumático, unidad de mantenimiento, convertidor I/P, compresor neumático. A continuación, se describe cada elemento que se seleccionó.

### 3.4.1. Motor

Se tomó como criterio el hecho de que su sistema eléctrico sea trifásico, para el cambio de dirección y para que entregue a los procesos de desgaste las distintas velocidades que deben cumplirse de acuerdo con las normas establecidas. Se optó por reutilizar el motor de referencias WEG W22 (Figura 32a), del equipo anterior, ya que cumple con estas especificaciones. Este motor tiene una caja de conexiones que permite una mayor facilidad de manejo de los cables durante la instalación, el espacio para la instalación de accesorios y fácil mantenimiento ya que es más grande; además, los anillos de fijación a los rodamientos cuentan con una estructura reforzada para evitar deformación durante el mecanizado. Para la configuración de velocidad fue necesario utilizar un variador de frecuencia, el cual está integrado sistemáticamente al control lógico programable, que controla todo el proceso de desgaste automatizado. Es importante mencionar, que, la norma ASTM G-65, recomienda un motor de 0.7 kW, por lo tanto:

$$0.7 \text{ kW} * \frac{1.34102 \text{ HP}}{1 \text{ kW}} = 0.938714 \text{ HP} \approx 1 \text{ HP} \quad (\text{Ec } 8)$$

De la ecuación anterior, se deduce que, el disco será impulsado por un motor trifásico de corriente continua nominal de 1 HP, característica que se encuentra estipulada en la Tabla 14.

**Tabla 14.** Características de motor trifásico [29].

MOTOR TRIFÁSICO	
Modelo	WEG W22
Potencia	1 HP
RPM	1800
Entrada de tensión	220 / 440 V

### 3.4.2. Pantalla HMI integrada con PLC

Para el control automatizado de los procesos de desgaste G65 y G105, se decidió utilizar una pantalla táctil de 7 pulgadas (Figura 32b), la cual está integrada al control lógico programable (PLC), tiene 16 entradas y 14 salidas análogas. La edición de la pantalla HMI es simple e intuitiva, con funciones ricas, y el área de visualización es compatible con el tacto, ya que deja visualizar todos los elementos de control que están ligados al sistema de control. Su estructura es tan compacta, que ahorra mucho espacio en el gabinete del control eléctrico, además, admite un recuento de alta velocidad, pulso de alta velocidad, interrupción externa. En la Tabla 15 se caracteriza la pantalla.

**Tabla 15.** Características de la pantalla HMI integrada con PLC [30].

PANTALLA HMI & PLC	
Modelo	ZG3-30R-7
Tipo de pantalla	Pantalla LCD, táctil
Tamaño de pantalla	7 pulgadas
Resolución	800 * 480 píxeles
Entradas de interruptor	16 o 10 puntos
Salidas de conmutación	14 o 10 puntos

### 3.4.3. Variador de velocidad

Se eligió un variador de velocidad flexible, comunicativo, fácil de usar, Esto es ideal para un control de motor preciso y eficiente a través de una interfaz HMI integrada al PLC (Figura 32c). La combinación adecuada de funciones garantiza que el convertidor de frecuencia sea adecuado para su tarea, al igual que su diseño e instalación compactos. El VLT Midi Drive, está diseñado para funcionar a una temperatura ambiente de carga completa de 45 °C y una temperatura ambiente reducida de 55 °C. Esta capacidad significa que no es necesario instalar equipos de refrigeración adicionales ni aumentar el tamaño del convertidor de frecuencia, lo cual es ideal, ya que no es necesario reducir su potencia y, por lo tanto, no es necesario adquirir equipos adicionales, lo que reduce los costes operativos de instalación y permite ahorrar espacio, en la Tabla 16 se referencias sus principales características.



**Tabla 16.** Característica del variador de velocidad [31].

VARIADOR DE FRECUENCIA	
Modelo	VLT Midi Drive FC 280
Tensión de alimentación	200 / 240 V
Potencia	0.75 kW
Entradas digitales	6 o 7
Salidas digitales	1

#### 3.4.4. Fuente de voltaje

Es indispensable en un sistema de automatización, porque suministra un voltaje constante a todo el circuito a pesar de tener cualquier otra condición, tal como fluctuaciones de corriente o qué tipo de resistencia tiene la carga. La Figura 32d., muestra la fuente, la cual está directamente conectada a la pantalla HMI y al variador de velocidad, brindándoles una alimentación confiable de corriente sin ningún tipo de variación voltai-ca inesperada a sus componentes. Específicamente, esta fuente tiene un montaje tipo riel DIN y se encuentra ubicada dentro del gabinete del control eléctrico del tribómetro para una obtener una mayor protección. En la Tabla 17., se referencian sus principales características.

**Tabla 17.** Características de la fuente de voltaje [32].

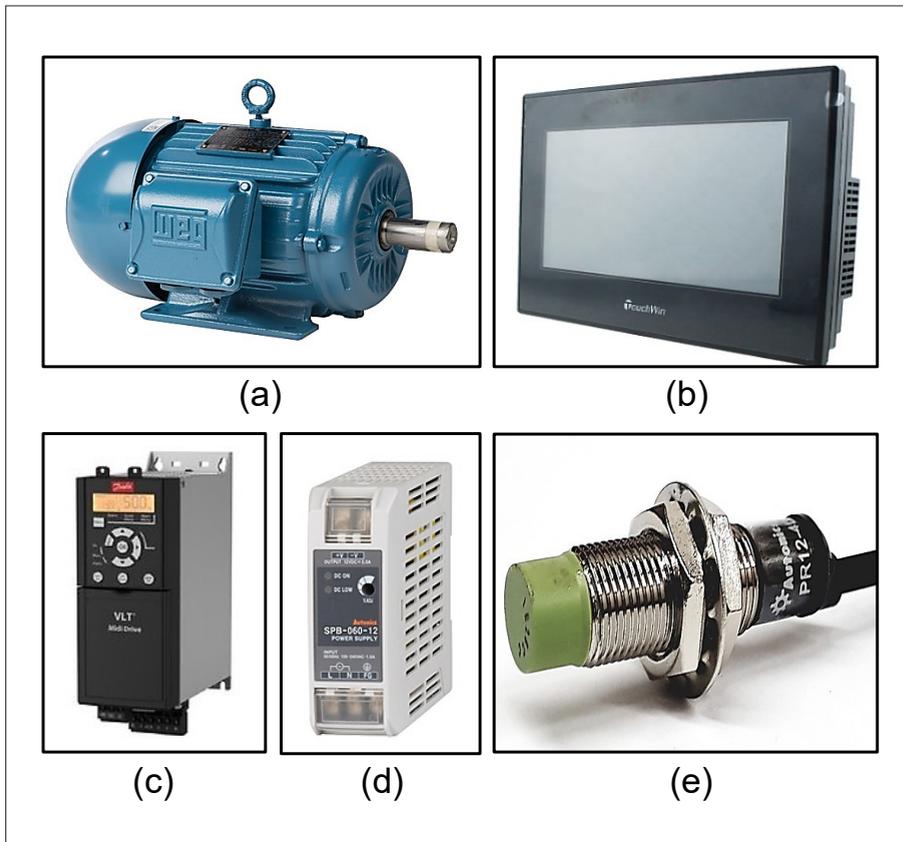
FUENTE DE VOLTAJE	
Modelo	SPB
Potencia	60 W
Voltaje	12 VDC
Corriente	5.0 A
Tensión permitida	85/264 VCA

#### 3.4.5. Sensor de proximidad

Se optó por reutilizarlo del equipo anterior Figura 32e, el sensor inductivo Autonics PR12-4DN, cuenta con las configuraciones descritas en la Tabla 18., dicho sensor se encuentra en un lazo de control directamente conectado con la pantalla PLC, con la cual brinda la posibilidad de poder medir la cantidad de vueltas que se están produciendo en el momento de la prueba.

**Tabla 18.** Características de sensor de proximidad [33].

SENSOR DE PROXIMIDAD	
Tipo	Cylindrical round (Serie PR)
Distancia de detección	Distancia de detección 4 mm
Dimensión del encabezado / cuadrado	12 mm
Voltaje	12 - 24 VDC
Tipo de alambre	DC de 3 hilos



**Figura 32.** Elementos del circuito eléctrico; (a) Motor trifásico [29]; (b) Pantalla HMI integrada con PLC [30]; (c) Variador de velocidad [31]; (d) Fuente de voltaje [32]; (e) Sensor de proximidad [33].



### 3.4.6. Compresor

Desempeña un papel importante en el sistema neumático porque debido a sus características el sistema, obtiene la presión necesaria para que el cilindro neumático mantenga la probeta en el disco durante el proceso de desgaste según el tiempo brindado por la norma; así, como también, brindar el aire necesario para accionar los actuadores rotativos y cumplan su respectiva función durante el proceso. El compresor se encarga de que el aire que extrae del ambiente tenga la presión suficiente para completar el circuito. En este caso, el aumento de presión lo hace el motor eléctrico (Figura 33a). En la Tabla 19., se observan las características del compresor.

**Tabla 19.** Características del compresor neumático [34].

COMPRESOR	
Capacidad del tanque	20 L
Potencia máxima	2 1/2 HP
Voltaje	110 V
Caudal de aire	224 l/min
Presión máxima	120 psi

### 3.4.7. Actuador neumático y válvula

Se seleccionó un actuador neumático rotativo de 90 grados (Tabla 20) el cual se encuentra unido a la válvula de cierre de 3/4 Pulg. NPT. Estos actuadores neumáticos funcionan a través del aire comprimido que darán apertura y cierre del agente abrasivo para el caso de la norma ASTM G65 y del agua para el caso ASTM G105 respectivamente (Figura 33b).

**Tabla 20.** Característica del actuador neumático [35].

ACTUADOR NEUMÁTICO	
Serie	GNP-14
Fluido de accionamiento	Aire seco o lubricado
Presión de suministro de aire	2 a 8 bar
Temperatura de funcionamiento	-20 °C a +80 °C
Recorrido del ajuste	±5° a una rotación de 90°
Presión máxima	8 bar

Para el criterio de selección de estos actuadores neumáticos, se prestó atención al diámetro del eje de la válvula, ya que por medio de esta medida se hace la respectiva conexión con el actuador, en este caso, el eje de una válvula de 3/4 tiene una medida nominal de 11 mm. Cada actuador tiene un debido consumo de aire, este depende de la presión, del volumen y del tiempo del ciclo y se calcula por la ecuación (9).

$$\frac{l}{\text{min}} = \frac{(\text{Volumen de aire Abriendo} + \text{Volumen de aire Cerrando}) * \left[ \frac{(\text{Presión de aire alimentación (Kpa)} + 101.3)}{101.3} \right]}{\text{T tiempo duración del ciclo (min)}}$$

$$\frac{l}{\text{min}} = \frac{(\text{Volumen de aire Abriendo} + \text{Volumen de aire Cerrando}) * \left[ \frac{(\text{Presión de aire alimentación (Kpa)} + 101.3)}{101.3} \right]}{\text{T tiempo duración del ciclo (min)}}$$

[45] (Ec 9)

Los valores del volumen del aire abierto y cerrado del actuador GNP 14 se ven referenciados en la Tabla 21.

**Tabla 21.** Valores del aire abierto y cerrado de los actuadores [43].

MODELO	VOLUMEN ABIERTO	VOLUMEN CERRADO	MODELO	VOLUMEN ABIERTO	VOLUMEN CERRADO
GNP 14	0.08	0.11	GNP 300	1.60	1.40
GNP 24	0.12	0.16	GNP 513	2.5	2.2
GNP 44	0.21	0.23	GNP 800	3.7	3.2
GNP 60	0.30	0.34	GNP 1280	5.9	5.4
GNP 94	0.43	0.47	GNP 1600	7.5	7.5
GNP 135	0.64	0.73	GNP 2300	11.0	9.0
GNP 198	0.95	0.88	GNP 2500	17.0	14.0

### 3.4.8. Cilindro neumático

Para el nuevo diseño de la máquina, no se incluyó el brazo compuesto por el porta probetas y el sistema de anclaje para el peso articulado con pivote, sino que se utilizó un cilindro neumático (Tabla 22), que está anclado a



una placa convencionalmente diseñada para ser ajustada por espárragos a la estructura tubular, el cual usa la fuerza del aire comprimido para extenderse y presionar la probeta contra la rueda de caucho con la fuerza requerida por la norma ASTM G65 y ASTM G105, en cada uno de sus procedimientos de desgaste, y de la misma forma, contraerse para regresar a su origen amortiguado elásticamente. Cuando el cilindro se encuentra sometido a la fuerza de fricción generada por la rueda de caucho en la punta del pistón, la configuración de los tres cilindros paralelos actúa para proporcionar un valor dinámico admisible, con el cual se puede trabajar de manera propicia. Además, debido a todos estos procesos se originan unos mínimos valores de ángulos de deflexión en el pistón, los cuales se encuentran en rangos favorables garantizando una alta resistencia al giro, pandeo y solidez durante los procesos de desgaste (Figura 33c).

**Tabla 22.** Característica del cilindro neumático [36].

CILINDRO NEUMÁTICO	
Serie	MCGS-03-25-25
Tipo de actuación	Doble efecto
D.I. del tubo	25 mm
Medio	Aire
Presión de prueba	1,5 MPa

Se seleccionó el de diámetro interno del tubo de 25 mm, y la carrera estándar de 25 mm, ya que entre menos carrera tenga el cilindro, se presentará la menor flexión causada en el vástago cuando se encuentre extendido aplicando la presión y recibiendo la fuerza de rozamiento por parte del disco. Asimismo, otro criterio de selección es el factor de operación en el entorno, en ambientes secos y “no agresivos”, los cilindros de varilla de acero cromado suelen ser suficientes. Sin embargo, en ambientes de trabajo húmedos como los que tienen riesgo de rociar algunas partículas, todas las superficies externas del cilindro necesitarán ser recubiertas y el vástago del cilindro debe ser en acero inoxidable. Para otras aplicaciones, existen opciones para instalar anillos raspadores de metal en contra de las versiones de plástico o caucho con el sello del vástago para eliminar el residuo antes de que pueda dañar el conjunto del cilindro.

### 3.4.9. Electroválvula

Este dispositivo en particular, responde a pulsos eléctricos. Debido a la corriente que circula por el solenoide, la válvula se puede abrir o cerrar, controlando así el flujo de fluido, que en este caso es neumático. La forma en la que funciona una válvula solenoide, es que cuando la corriente circula a través del solenoide, crea un campo magnético que atrae el núcleo en movimiento, y cuando termina el efecto del campo magnético, el núcleo vuelve a su posición, en la mayoría de los casos, debido a la influencia del resorteo (Figura 33d). Es obligatorio que todos componentes neumáticos de este equipo (cilindro, actuador) presenten una electroválvula, ya que les brindará el debido control programado del fluido, durante todos los procesos de desgaste. Sus características se encuentran en la Tabla 23.

**Tabla 23.** Característica de la electroválvula [35].

ELECTROVÁLVULA 5/2	
Marca	Micro
Presión	1.5 a 8 bar
Voltaje	220 V
Temperatura	-5 a 60°C
Frecuencia	50/60 Hz

### 3.4.10. Unidad de mantenimiento/Filtro

Su función está enfocada a obtener aire limpio para que no se produzca ningún tipo de avería en el circuito. La unidad de mantenimiento realiza tres funciones básicas, como son: regular la presión, filtrar y lubricar el aire. El objetivo es garantizar un aire de calidad para todo el sistema, para cada proceso de desgaste, ya sea en una de las pruebas G65 o G105 (Figura 33e), y sus características se encuentran en la Tabla 24.

**Tabla 24.** Característica de la unidad de mantenimiento [37].

UNIDAD DE MANTENIMIENTO - FILTRO	
Modelo	AW4000-04
Rango de presión	0.05 - 0.85 MPa
Presión máxima	1.0 MPa
Temperatura máxima	60°C



Este sistema posee un manómetro que indica dos tipos de medida de presión, ya sea en psi (pound per square inch, por sus siglas en inglés) o en bar (sistema internacional) circulando en el sistema y un gancho para anclarse en la parte más conveniente del panel del sistema neumático. Conjuntamente, el drenaje se hace de forma manual para una fácil función de mantenimiento, posee un regulador operado por diafragma que funciona como un tipo de alivio, un separador con su debida protección para que se presente una separación eficiente de la humedad y una perilla en la parte superior sin levantar para bloquear a cualquier presión de ajuste.



**Figura 33.** Elementos neumáticos; (a) Compresor neumático [34]; (b) Actuador neumático y válvula [35]; (c) Cilindro neumático [36]; (d) Electroválvula [35]; (e) Unidad de mantenimiento [37]; (f) Convertidor I/P [38].

### 3.4.11. Convertidor I/P

Este convertidor brinda un método confiable, repetible y preciso para convertir señales eléctricas en señales neumáticas, para ser usadas en equipos neumáticos o actuadores de válvulas, en este caso, tiene una entrada de 4-20 mA y 3-120 psi. El rango de salida de intervalo extendido, que es responsable para guiar y regular el cilindro debido a las diferentes fuerzas manejadas en los programas estándar G65 y G105. Se pueden apreciar estas características en la Tabla 25.

**Tabla 25.** Características del convertidor I/P [38].

CONVERTIDOR I/P	
Modelo	TYPE 1000
Entrada	4-20 mA
Rango de salida	3-120 psi

Los modelos de este dispositivo, generalmente, están disponibles en acción hacia adelante y hacia atrás, y se puede seleccionar en el campo una gama completa de entrada o salida dependiendo de la situación. Este tipo de convertidor I/P en particular (Figura 33f) no es normal en el mercado, ya que siempre se comercializan aquellos de bajos estándares en cuanto al rango de presión de salida, es por ello, por lo que este tipo en específico están ubicados en la categoría de rango extendido.

### 3.4.12. Celdas de carga

Es un transductor que puede medir peso o fuerza y convertirlo en una señal eléctrica a través de un dispositivo mecánico, la fuerza medida deforma el sensor y convierte el desplazamiento o deformación en una señal eléctrica (Figura 34). Estas celdas soportan cerca de 110 libras; es decir, aproximadamente 50 Kg (Tabla 26), están ubicadas en las ranuras cuadradas de 35x35 mm, hechas a la medida en el conector entre la porta probetas y el cilindro neumático para recibir la fuerza de rozamiento que se produce en la probeta. Están diseñadas para medir la fuerza en una dirección y debido a la sensibilidad del sensor proporciona lecturas exactas.



**Figura 34.** Celda de carga [39].

**Tabla 26.** Características de la celda de carga [39].

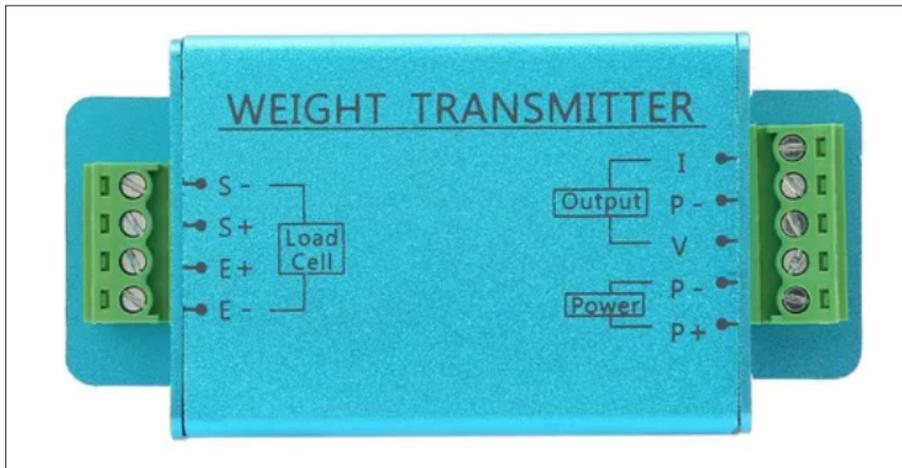
CELDA DE CARGA Sen-10245	
Voltaje	<10 V
Capacidad	110 Lb o 50 Kg
Material	Aluminio
Temperatura	0°C a 50°C
Sensibilidad	1.0±0.1

### 3.4.13. Transmisor de peso

Se utiliza para amplificar con precisión la señal de salida del sensor, el regulador del voltaje interno, el puente de corriente constante, la conversión de voltaje y corriente, la adaptación de impedancia, la compensación lineal, la compensación de humedad, etc. (Figura 35). Este transmisor convierte específicamente el movimiento que se originan en las celdas de cargas en la salida de señal de corriente y voltaje estándar, que se puede cambiar de 0 ~ 5V/0 ~ 10V (Tabla 27).

**Tabla 27.** Especificaciones del transmisor [40].

TRANSMISOR DE CELDA DE CARGA	
Modelo	DY510
Exactitud integral	0.05%
Fuente de alimentación	15 - 30 VDC
Señal de salida	4 - 20 mA / 0 - 10 V



**Figura 35.** Transmisor de celda de carga [40].

El circuito presenta en su configuración dos celdas de cargas conectadas entre sí para adelantar una medición en conjunto (Figura 36). Para conectar la celda al transmisor de peso son necesarios 3 cables, los colores utilizados habitualmente son blanco, negro y rojo, cada color corresponde a una señal como se muestra a continuación:

**Celda 1:**

- Blanco: Voltaje de excitación -, E+
- Negro: Voltaje de excitación +, E-
- Rojo: Amplificador +, Señal +, S-

**Celda 2:**

- Negro: Voltaje de excitación -, E+
- Blanco: Voltaje de excitación +, E-
- Rojo: Amplificador +, Señal +, S+

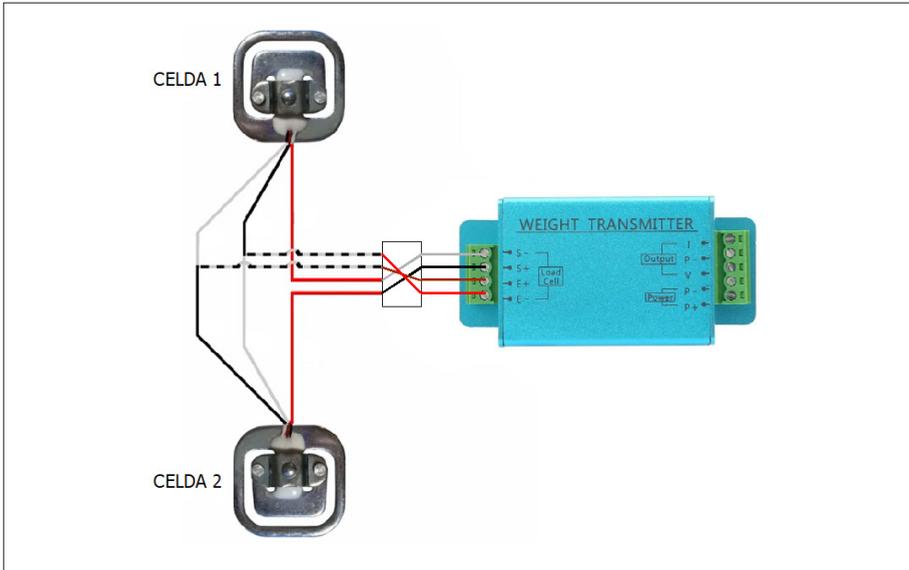


Figura 36. Conexión de las celdas de carga y el transmisor de peso.

### 3.4.14. Transmisor de voltaje a corriente

La señal que envía va dirigida hacia el puerto de entrada de voltaje del PLC de 24V y 0V y a la tarjeta análoga para leer la señal proveniente de las celdas (Figura 37).



Figura 37. Transmisor de corriente [41].

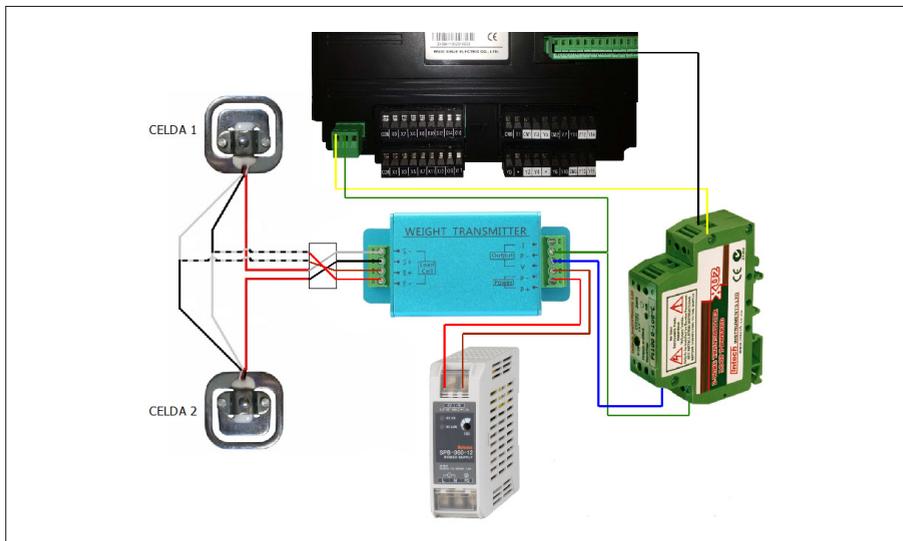
Este módulo de corriente del interruptor de voltaje es quien convierte la señal de voltaje de 0-5 VDC en señal de corriente de 4-20 mA (Tabla 28).

**Tabla 28.** Especificaciones del transmisor [41].

CONVERSOR TRANSMISOR	
Voltaje de entrada	0 a 5 VDC
Corriente de salida	4-20 mA
Ajuste de rango	Ajuste Zero

Todo el circuito electrónico se encuentra conectado al transmisor de peso, dichas conexiones al transmisor de corriente, la fuente de voltaje, la tarjeta analógica del PLC y su puerto de voltaje se emplean de la siguiente manera (Figura 38).

- **Marrón:** (transmisor de peso) P- a (fuente de voltaje) -V
- **Rojo:** (transmisor de peso) P+ a (fuente de voltaje) +V
- **Azul:** (transmisor de peso) V a (transmisor de corriente) P5
- **Verde:** (puerto de voltaje PLC) 0V; (transmisor de peso) P a (transmisor de corriente) P7
- **Amarillo:** (puerto de voltaje PLC) 24V a (transmisor de corriente) P1
- **Negro:** (tarjeta analógica PLC) A10 a (transmisor de corriente) P2



**Figura 38.** Conexión electrónica completa.



### 3.4.15. Ruedas

Selectivamente se adquirieron tres ruedas fijas y tres ruedas giratorias con frenos para tener dirección al momento de desplazar el equipo con mucha más facilidad (Figura 39).



**Figura 39.** Ruedas del tribómetro [42].

Estas ruedas tienen un diámetro  $2\frac{1}{2}$ " y cada una tiene una capacidad de carga de 80kg (Tabla 29), suficiente para soportar todo el peso del tribómetro ya que este, a su máxima capacidad estaría llegando a los 200 kg. Se fabricó para cada rueda, una planchuela en lámina de acero ASTM A36 con  $\frac{1}{4}$ " de espesor, a las cuales se le realizaron 4 perforaciones de  $\frac{5}{16}$ ", para su ajuste mediante tornillos.

**Tabla 29.** Características de las ruedas [42].

RUEDAS	
Diámetro	2.5 "
Peso soportado	80 kg
Ruedas fijas	3
Ruedas giratorias	3

## 3.5. Construcción del equipo

### 3.5.1. Materiales y equipos para la construcción del tribómetro

En la Tabla 30 y 31, se enlistan todos los materiales, equipos y consumibles usados en la construcción y puesta a punto del tribómetro.

**Tabla 30.** Herramientas para la fabricación del tribómetro.

NOMBRE	CANTIDAD
Pulidora Makita 7"	2
Pulidora Makita 4-1/2"	1
Tronzadora Makita de 14"	1
Máquina de soldar multiproceso Lincoln 210 MP	1
Torno	1
Fresadora	1
Taladro de pedestal	1
Dobladora industrial	1

**Tabla 31.** Consumibles usados para la fabricación del tribómetro.

NOMBRE	CANTIDAD
Disco de pulidora de 7"x 1/16"	6
Disco de pulidora de 7"x 1/8"	4
Disco de pulidora de 7"x 1/4"	2
Disco de tronzadora de 14"	1
Grata circular	1
Alambre arco sumergido de 3/32"	1
Juego de brocas (3/32", 1/8", 1/4", 3/8", 1/2")	1
Anticorrosivo epóxico Pintuco de color blanco.	1/2 galón
Esmalte Pintuco de color gris plata.	1 galón

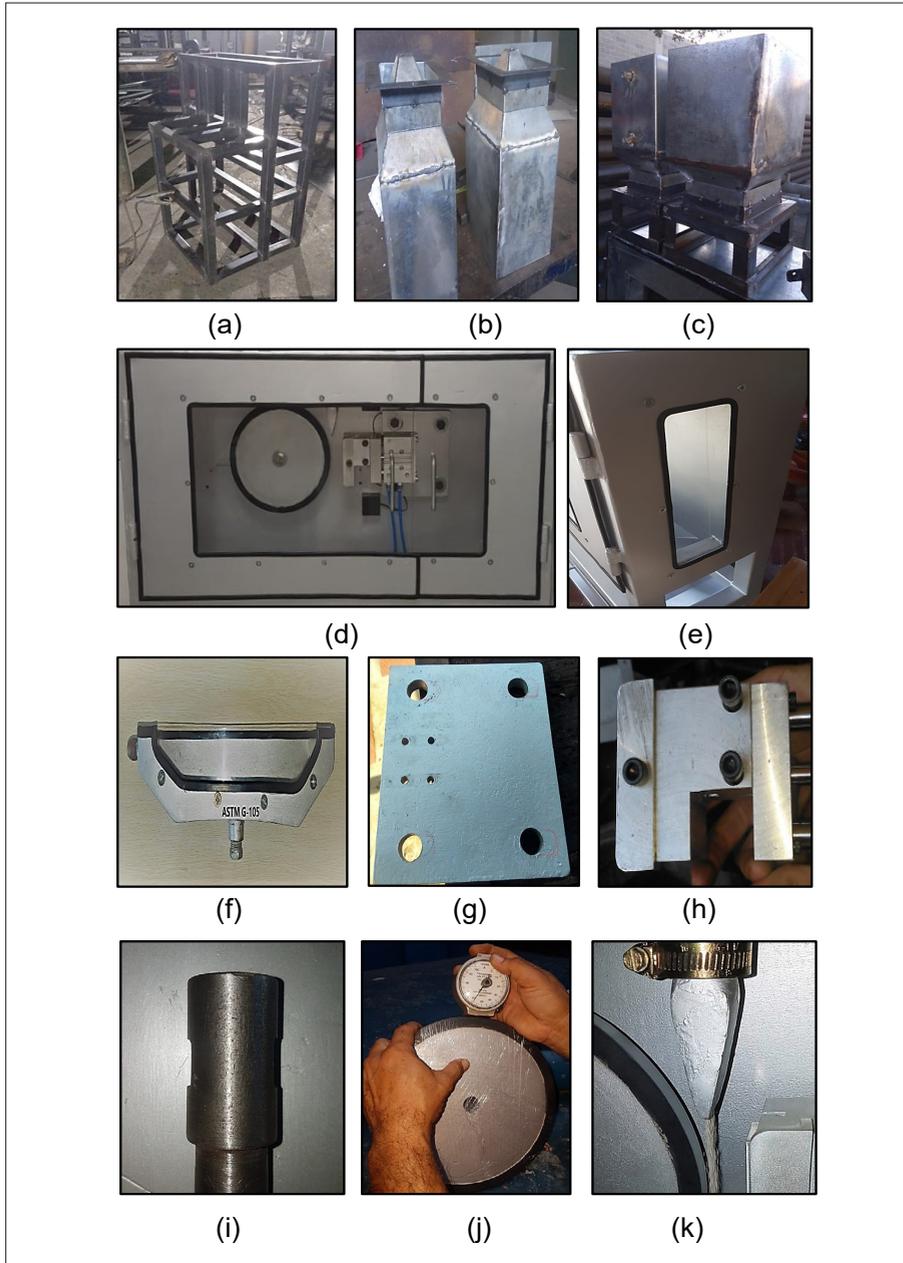
### 3.5.2. Elaboración de elementos del equipo por procesos de manufactura

La construcción del equipo se llevó a cabo siguiendo los lineamientos de la selección del tipo de juntas y los procesos de soldadura, en las instalaciones de la empresa *JBSI Constructor*; para ello, se dispuso de un grupo de trabajo, el cual estaba compuesto por un soldador-armador, el cual cumplía la función de armar la estructura y soldar la misma, dos ayudantes, los que se encargaban de cortar, esmerilar y apuntalar las juntas soldadas.



### 3.5.2.1. Estructura

En esta construcción, se dispuso de uniones rígidas mediante soldadura bajo el proceso GMAW (soldadura de arco con alambre continuo bajo protección gaseosa) utilizando una máquina de soldar multiproceso Lincoln 210 MP; se utilizó como gas de protección una mezcla entre argón y dióxido de carbono, y como hilo conductor, se manejó alambre de referencia ER70s-6, el cual está fabricado de acero al carbono con un recubierto de cobre. De esta construcción, se utilizaron juntas a tope, en T y en esquina, mediante un cordón oscilante, realizando una penetración completa (CJP) en la estructura, en donde todo el material base (elemento soldado) es fundido con el metal de aporte (alambre) y una penetración parcial en el contenedor y el difusor donde intencionalmente solo una porción del metal base es fundido con el metal de aporte. Esta técnica se maneja para no perforar la cara interna de componente y cambiar su geometría, lo cual puede obstruir el paso del flujo del abrasivo; para una buena producción de la soldadura, se limpió la superficie con una grata circular removiendo toda cascarilla suelta o gruesa, escoria, oxido, humedad, grasas y demás materiales extraños que puedan afectar el proceso. Posterior a esto, se limaron las caras de los cortes, con el propósito de dejarlas lisas, uniformes y libres de aletas evitando toda clase de discontinuidad tales como ralladuras, fisuras, entre otras. Los ensambles de las juntas PJP, fueron construidas respetando el código de soldadura AWS D1.1 en donde, en la sección 5.22.2 plantea que la junta de separación de la raíz entre partes no debe exceder  $3/16''$  [26]. Las juntas a tope son construidas respetando el código de soldadura AWS D1.1 donde en la sección 5.22.3 plantean que el alineamiento de las juntas a topes debe ser alineadas cuidadosamente utilizando escuadras metálicas y nivel. Recordando que los desplazamientos máximos deben ser el 10% del espesor de la parte unida más delgada y su alineación, debe ser colocada para evitar pendientes más grandes a  $1/2''$  en longitudes de por lo menos  $12''$ , utilizando la línea central de las partes para tomar las medidas de los desplazamientos [25]. Para la elaboración de la estructura del equipo, la cual está conformada por una tubería estructural de acero ASTM A-36 de 50X50X2 mm, se ejecutaron cortes a dicha tubería implementando la tronzadora. Posteriormente, se armó la estructura usando unión rígida con soldadura SMAW (Figura 40a).



**Figura 40.** (a) Fabricación de la estructura metálica; (b) Fabricación de las tolvas; (c) Instalación de soportes en las tolvas; (d) Instalación de puertas; (e) Ventanas; (f) Contenedor de mezcla; (g) Placa de apoyo para el cilindro neumático; (h) Porta probetas; (i) Eje conector; (j) Medición de dureza a disco, (k) Boquilla instalada en el equipo.



### 3.5.2.2. Tolvas de arena y agua

Para su construcción se utilizaron láminas galvanizadas calibre 14, a las cuales se les hizo un doblado de 90° en tres de sus esquinas; luego, se efectúa una unión rígida en la cuarta esquina, aplicando soldadura con el proceso SMAW. Para darle mayor rigidez, se aplicó soldadura en la parte piramidal a un perfil en L, para su acoplamiento con sus respectivos soportes; igualmente se instaló en la boquilla, una unión bushing de 3/4" NPT, para realizar el ensamble con los actuadores neumáticos (Figura 40b).

### 3.5.2.3. Soporte de las tolvas

Se fabricaron a partir de un ángulo de acero ASTM A36 con dimensiones de 3" x 3" x 3/16". Sus uniones rígidas fueron aplicadas con soldadura GMAW. Tiene cuatro perforaciones de 3/8" en la parte superior, para su ensamble con las tolvas y cuatro perforaciones de 3/8" en la parte inferior para su ensamble con la estructura. Cuenta con una cubierta en acrílico de 5 mm de espesor, para proteger los actuadores rotativos, ya que son elementos neumáticos muy delicados (Figura 40c).

### 3.5.2.4. Puertas

Están constituidas por una lámina galvanizada calibre 16 en forma de "C" con varias perforaciones de 1/4" para su ensamble por medio de tornillos, a una lámina de acrílico de 5 mm de espesor. Fueron diseñadas de forma "doble hoja", para que se pueda apreciar todo lo que ocurre en el interior durante los procesos de desgaste. La puerta principal, es de mayor tamaño y presenta cierres magnéticos para una rápida apertura; la puerta secundaria se encuentra configurada de manera que en cada proceso de desgaste permanezca cerrada, por lo cual tiene cierre de presión, solo se debe abrir para realizar mantenimiento al equipo (Figura 40d).

### 3.5.2.5. Ventanas

Se fabricaron a partir de una lámina galvanizada calibre 18, soldadas a la estructura en la parte lateral; posee con 6 perforaciones de 1/4" para su ensamble por medio de tornillos, a una lámina de acrílico de 5 mm de espesor, de forma que se pueda tener una visión desde sus partes laterales del proceso de desgaste (Figura 40e).

### **3.5.2.6. Contenedor G-105**

Se diseñó según los criterios de la norma ASTM G105. Se fabricó a partir de una lámina galvanizada calibre 14, a la cual se le hicieron varios dobleces, luego se realizó una unión rígida en las pestañas, aplicando soldadura con el proceso SMAW, se le adicionaron unas orejas con perforaciones en los extremos para su instalación en la placa trasera de la estructura, además, de colocar toda su parte delantera visible con una lámina de acrílico de 5 mm de espesor. Por último, se le realizó un punto de entrada de agua por medio de una unión roscada, que se ensambla a una manguera que va conectada a la válvula de la tolva de agua, y un punto de desagüe cuando se termine el proceso (Figura 40f).

### **3.5.2.7. Placa de apoyo para el cilindro**

Se fabricó a partir de una lámina de acero ASTM A36 de  $\frac{1}{2}$ " de espesor, cortada de forma rectangular a través de una máquina de plasma, cuenta con cuatro perforaciones de  $\frac{3}{4}$ " para su instalación en la estructura por medio de tornillos, y cuatro perforaciones de  $\frac{1}{4}$ " para el ensamble del cilindro neumático, ya que su función es sostener el cilindro fijamente en su puesto para que cumpla con los diferentes procesos de desgaste (Figura 40g).

### **3.5.2.8. Porta probetas**

Su función es sujetar la probeta durante el procedimiento, con un sistema de sujeción mediante tornillería para su fácil montaje y desmontaje, según la norma. Se fabricaron a partir de barras cilíndricas de aluminio de diferentes diámetros y longitudes, las cuales fueron sometidas a procesos de mecanizado en un torno y posteriormente, en una fresadora, todo esto hecho de manera convencional (Figura 40h).

### **3.5.2.9. Eje**

Su función es conectar directamente las revoluciones que ofrece el motor a los discos, tiene medidas de 240 mm de longitud por 25.4 mm de diámetro, en la punta tiene una rosca interna M12 y se le soldó una chaveta de 4x4x10mm para evitar deslizamientos durante el giro con la rueda. Se rediseñó realizando dos guías para que el montaje y desmontaje de los discos sea más práctico (Figura 40i).



### 3.5.2.10. Discos de caucho

De los 5 discos que se encontraban del tribómetro antiguo, dos de ellos cumplían con las medidas y la dureza shore A Figura 40j, establecidas para la norma ASTM G65. Los otros tres discos restantes, se modificaron en cuanto a su diámetro, para que cumplieran con las medidas de la norma ASTM G105; es decir, fueron mecanizados para reducir sus diámetros y, se les realizó un nuevo proceso de vulcanización. A cada disco se le asignó una diferente dureza Shore-A como lo dicta la norma, estas durezas son de A50, A60, A70, y se le instalaron paletas de agitación para un mejor desarrollo durante el proceso de desgaste.

### 3.5.2.11. Boquilla dosificadora

Su función es distribuir la arena que proviene de la tolva para que caiga sobre la probeta y el disco de caucho (300 – 400 g/min). Para su elaboración, se realizaron cortes a una platina calibre 12, y un tubo galvanizado de ½" calibre 12, para luego realizar el ensamble entre ellos mediante soldadura SMAW. Esta boquilla se conecta con una manguera la cual se acopla a la válvula de la tolva de arena (Figura 40k).

### 3.5.3. Ensamble del equipo

En la parte de los elementos mecánicos, el ensamble del equipo se llevó a cabo, usando uniones rígidas (mediante soldadura SMAW) y desmontables (Figura 41). Para poder realizar las uniones desmontables, se realizaron perforaciones en parte de la estructura.



Figura 41. Ensamble del equipo [Autor].

### 3.5.4. Pintura del equipo

En primera instancia, se le aplicó una base epóxica de 3 mm de espesor en película seca de color blanco; posteriormente, se le aplicó esmalte de color gris plata pintulux. Para ambos procesos se utilizó un compresor y una pistola para pintura (Figura 42).



**Figura 42.** Estructura en el proceso de aplicación de pintura.

### 3.5.5. Instalación de elementos eléctricos

Para garantizar la seguridad de estos elementos, se decidió instalar un gabinete eléctrico en la parte superior de la estructura metálica, teniendo en la parte frontal la pantalla con PLC incorporada, la cual controlará todo el proceso para la evaluación del desgaste, esta pantalla estará conectada con el variador VLT Midi Drive FC 280, el cual requiere de una conexión de 220V bifásica con su puesta a tierra, este energiza a su vez el motor WEG de 1 HP sacando una conexión trifásica con su puesta a tierra, el variador desfasa la onda de corriente a diferentes frecuencias, así, se obtiene una velocidad angular distinta para cada frecuencia. El sistema de refrigeración instalado al motor, se energiza con la conexión 220V, usando la puesta a tierra y una de las líneas para dividir el voltaje y así obtener solo el requerido por el ventilador (Figura 43).



**Figura 43.** Conexión eléctrica del tribómetro [Autor].

### **3.5.6. Instalación de elementos neumáticos**

Para el accionamiento del sistema neumático, el compresor se encargará de enviar la presión necesaria de 110 PSI a los diferentes elementos neumáticos, durante el proceso de desgaste, según el tiempo establecidos por cada una de las normas. Para la instalación de los elementos neumáticos en la estructura, se utilizaron uniones desmontables (Planchuelas metálicas y tornillería) en la parte trasera del equipo. La conexión entre los elementos del control neumático se realizó usando diferentes accesorios roscados (uniones, racores, prensa estopa, etc.) y mangueras (Figura 44).

### **3.5.7. Costos de la construcción del equipo**

Para la construcción del equipo se adquirieron materiales y mano de obra, los cuales están descritos en la Tabla 32, que se presenta a continuación.



Figura 44. Instalación de los elementos neumáticos [Autor].

**Tabla 32.** Costos de la construcción del equipo.

Ítem	Descripción	Cant.	Fuente*			\$ Unitario	\$ Total
			Est.	UA	Ext.		
1	Tribómetro de desgaste abrasivo con la norma ASTM G-65	1		e		\$ 10.836.439,90	\$ 10.836.439,90
2	Perfil cuadrado 40 x 40 x 2 mm x 6m (largo)	3		E		\$ 62.000,00	\$ 186.000,00
3	Láminas galvanizadas calibre 14 (1 x 2 metros)	1		E		\$ 86.400,00	\$ 86.400,00
4	Láminas galvanizadas calibre 16 (1 x 2 metros)	1		E		\$ 72.000,00	\$ 72.000,00
5	Láminas galvanizadas calibre 18 (1 x 2 metros)	1		E		\$ 61.300,00	\$ 61.300,00
6	Ángulo de 3"x3"x 3/16" (6 metros de largo)	1		E		\$ 52.400,00	\$ 52.400,00



7	Tubería galvanizada calibre 12 (1 metro)	1		E		\$ 10.000,00	\$ 10.000,00
8	Lámina de 1/2" de espesor, cortada con plasma con medida de 160x 155 mm	1		E		\$ 50.000,00	\$ 50.000,00
9	Barra cilíndrica de aluminio de Ø 5" x 5" de longitud	1	E			\$ 350.000,00	\$ 350.000,00
10	Mecanizado de barras de aluminio (Torno y fresadora)	1	E			\$ 550.000,00	\$ 550.000,00
11	Llantas de Ø 2-1/2" giratorias con frenos	3		E		\$ 16.400,00	\$ 49.200,00
12	3 llantas de Ø 2-1/2" fijas con frenos	3		E		\$ 16.400,00	\$ 49.200,00
13	Manijas niqueladas	5	E			\$ 2.500,00	\$ 12.500,00
14	Juegos de cierres magnéticos/ chapas	4	E			\$ 6.300,00	\$ 25.200,00
15	PLC integrado con pantalla	1		E		\$ 2.569.091,00	\$ 2.569.091,00
16	Unidad de mantenimiento	1		E		\$ 331.534,00	\$ 331.534,00
17	2 actuadores neumáticos con válvulas incorporadas	2		E		\$ 907.208,40	\$ 1.814.416,80
18	Cilindro neumático	1		E		\$ 593.631,50	\$ 593.631,50
19	Variador de frecuencia	1		E		\$ 878.815,00	\$ 878.815,00
20	Fuente de voltaje	1		E		\$ 188.258,00	\$ 188.258,00
21	Racores, acoples, mangueras. (Conexión neumática)	1		E		\$ 364.140,00	\$ 364.140,00
22	Compresor de aire de 90 PSI.	1	E			\$ 388.000,00	\$ 388.000,00
23	Celdas de carga	4	E			\$ 36.000,00	\$ 144.000,00
24	Convertidor IP	1	E			\$ 948.000,00	\$ 948.000,00
25	Gabinete eléctrico	1	E			\$ 100.000,00	\$ 100.000,00
26	Electroválvula	1	E			\$ 248.353,00	\$ 248.353,00
27	Módulo análogo	1		E		\$ 447.202,00	\$ 447.202,00
28	Lámina de acrílico de 5 mm de espesor de 1 x 2 m	1	E			\$ 285.000,00	\$ 285.000,00
29	Manguera de 1/2"	1	E			\$ 12.000,00	\$ 12.000,00
30	Adaptador de manguera de 1/2"	1	E			\$ 8.000,00	\$ 8.000,00

31	Empaques de neopreno de goma de 3/16" de espesor	1	E			\$ 50.000,00	\$ 50.000,00
32	Manguera de caucho de 3/4"	2	E			\$ 32.500,00	\$ 65.000,00
33	Adaptadores de manguera con rosca de 3/4"	2	E			\$ 13.000,00	\$ 26.000,00
34	Juego de tornillos avellanados galvanizado de 1/4" X 3/4", con tuerca y arandela.	50	E			\$ 850,00	\$ 42.500,00
35	Chumaceras	2	E			\$ 25.000,00	\$ 50.000,00
36	Reguladores de caudal	2	E			\$ 18.000,00	\$ 36.000,00
37	Transmisor de voltaje	1	E			\$ 950.000,00	\$ 950.000,00
38	Transmisor de peso	1	E			\$ 200.000,00	\$ 200.000,00
39	Accesorios de conexión electrónica	1	E			\$ 54.000,00	\$ 54.000,00
40	Licencia de software SolidWorks	1		e		\$ 500.000,00	\$ 500.000,00
41	Asesorías recibidas por el director (1 hora por 26 semanas)	26		e		\$ 30.000,00	\$ 780.000,00
42	Asesorías recibidas por el codirector (1 hora por 18 semanas)	18		e		\$ 30.000,00	\$ 540.000,00
43	Transporte general	1	E			\$ 250.000,00	\$ 250.000,00
44	Horas estudiantes (30h/semana) *24 semanas*2	720	e			\$ 10.000,00	\$ 7.200.000,00
						SUBTOTAL	\$ 32.454.581,20
* Utilice "E" para contribuciones en efectivo, "e" para contribuciones en especie.						IMPREVISTOS (10%)	\$ 3.245.458,12
						TOTAL	\$ 35.700.039,32

El ensamble del equipo, se hizo por medio de tuercas de seguridad en los diferentes tornillos que unen los elementos metálicos con los acrílicos, para evitar desajuste debido a las vibraciones. Para proteger los cables de las conexiones eléctricas y las mangueras de las conexiones neumáticas, se utilizaron canaletas plásticas, instaladas en la parte posterior del equipo, dándole un estilo y diseño conservador a la máquina (Figura 45).



**Figura 45.** Vista final del tribómetro automatizado.

### 3.6. Verificación del equipo

#### 3.6.1. Pre-operación de la máquina

##### 3.6.1.1. Preparación de las probetas

Antes de realizar los ensayos, se prepararon las probetas. Para la validación, se usaron varios materiales con el fin de cumplir con lo planteado en las normas ASTM G65 y ASTM G105, en sus diferentes procedimientos de evaluación. Para esto, las probetas se prepararon con los tamaños especificados por las normas que están soportados en la Tabla 33.

**Tabla 33.** Norma de desgaste y dimensiones de las probetas [21, 22].

NORMA	DIMENSIONES (ancho * alto * espesor) mm
ASTM G65	25.4 x 76.2 y entre 3.2 - 12.7
ASTM G105	25.4 x 57.2 y entre 6.4 - 15.9

Las probetas deben ser sometidas a unos parámetros de medición antes de ser inducidas a los diferentes procesos de desgaste, en este caso, las normas indican, que, se utilice una balanza analítica con una resolución de 0.0001 g para tomar su masa sobre el inicio y el final de las pruebas; también se recomienda utilizar un durómetro para realizar pruebas de durezas, y si es necesario, utilizar un horno para aplicarle el tratamiento térmico conveniente. Las pruebas de verificación del equipo, se centraron en evaluar la uniformidad de las huellas de desgaste dentro de las probetas tanto para la norma ASTM G65 y ASTM G105 con el fin de demostrar el funcionamiento del tribómetro.

##### 3.6.1.2. Parámetros de prueba

Para el desarrollo de las pruebas en general, la norma ASTM G65, describe 5 procedimientos de pruebas y la norma ASTM G105 refiere un solo procedimiento en donde se efectúan 4 ensayos con diferentes discos los cuales están descritos en la Tabla 34. En las pruebas con arena seca, se tomó el acero inoxidable martensítico AISI 403 y se empleó el procedimiento B, que suele usarse para materiales altamente resistentes a la abrasión, pero, es particularmente útil en la clasificación de los materiales de media y baja resistencia a la abrasión. Se realizaron de igual forma,

pruebas en arena seca con el aluminio con el procedimiento E ya que es un material con media a baja resistencia a la abrasión. Para el procedimiento con los ensayos 1, 2, 3 y 4 que pertenecen a las pruebas de arena húmeda, se utilizó el acero AISI 4140, el cual está dentro materiales con media resistencia a la abrasión.

**Tabla 34.** Parámetros de prueba [21, 22].

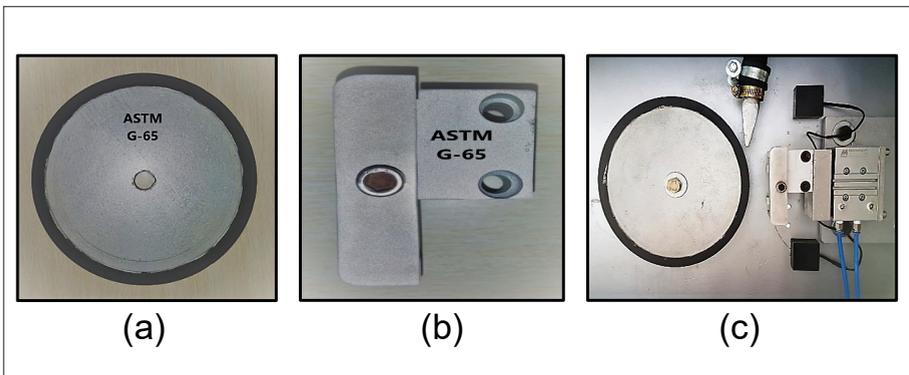
NORMA ASTM	Parámetro	Fuerza aplicada (N)	Revoluciones (rev)	Velocidad (RPM)	Abrasión lineal (m)
G65	A	130	6000	200	4309
G65	B	130	2000	200	1436
G65	C	130	100	200	71.8
G65	D	45	6000	200	4309
G65	E	130	1000	200	718
G105	1.2.3.4	222	1000	245	558

### 3.6.2. Puesta en marcha del tribómetro

Una vez preparadas las probetas, se procedió a realizar las pruebas con los procedimientos estipulados.

#### 3.6.2.1. Montaje de los elementos para la norma ASTM G65

Para las pruebas en arena seca, se realizó el montaje con las piezas adelantando los procedimientos B y E (Figura 46).



**Figura 46.** (a) Rueda de caucho de 228.6mm; (b) Porta probetas para ASTM G65; (c) Montaje completo de los elementos.

### 3.6.2.1.1. Montaje de la probeta y elección del procedimiento

Una vez instalados los elementos según la norma, el siguiente paso fue colocar la probeta de acero inoxidable para el procedimiento B (Figura 47), el cual estaba programado con los diferentes parámetros de la norma para iniciar el proceso de desgaste. Al tratarse de una prueba inicial, el diámetro del disco permanece igual a 228.6 mm, por lo que el número de vueltas se mantienen en 2000 Rev.



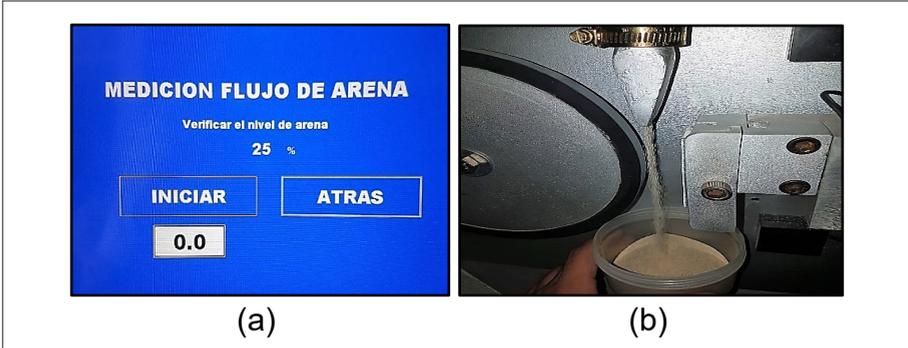
Figura 47. (a) Elección de procedimiento B; (b) Puesta de probeta.

### 3.6.2.1.2 Medición de flujo de arena

La norma ASTM G65, estipula que los valores del flujo del abrasivo deben estar de 300 a 400 g/min. Al oprimir el botón “FLUJO DE ARENA” se activó el actuador neumático conectado a la tolva de arena por un intervalo de tiempo de 60 segundos (1 minuto) y se recolectó el abrasivo en un recipiente (Figura 48b). El abrasivo recolectado se pesó en una balanza normal y los resultados se observan en la Tabla 35.

Tabla 35. Medición de flujo de arena.

Medición	Peso de la Arena (g)
1	317
2	316
3	317
4	316
5	315
Promedio	316.2



**Figura 48.** (a) Pantalla de flujo de arena; (b) Recolección del abrasivo.

De acuerdo con los resultados, el flujo promedio de abrasivo entregado por la boquilla es de 316.2 g/min. El flujo de arena debe medirse antes y después de cada prueba.

### 3.6.2.1.3 Calibración de la fuerza

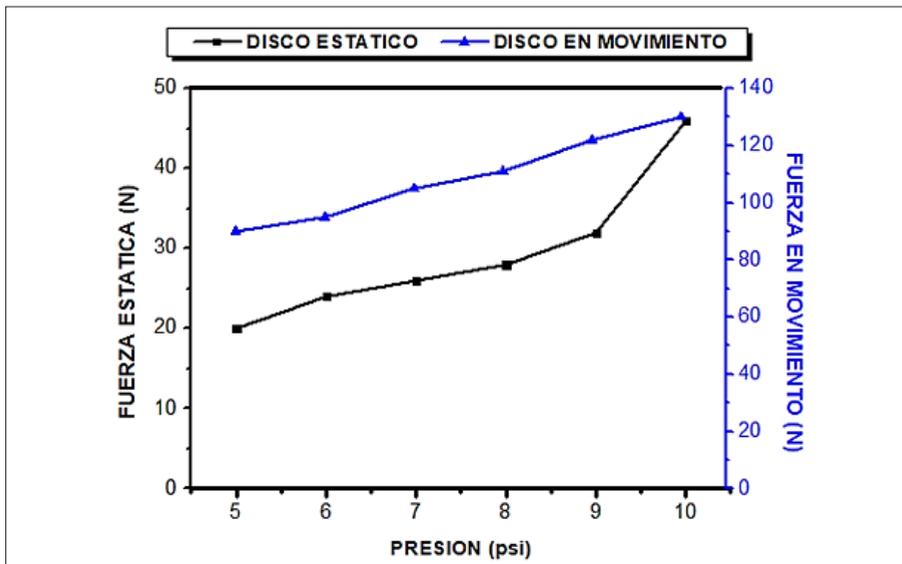
Esta norma indica que para el procedimiento B, se debe ejercer sobre la probeta con el disco en movimiento una fuerza de 130 N (30 Lb). En este caso, el tribómetro posee un nuevo sistema de presión y fuerza (Figura 49) al que se tomaron las lecturas con el disco estático y con el disco en movimiento hasta encontrar el punto de equilibrio de la fuerza requerida. Los resultados de esa calibración se ven reflejados en la Tabla 36 y graficados en la Figura 50.



**Figura 49.** (a) Pantalla de calibración de la fuerza; (b) Probeta sobre el disco estático.

**Tabla 36.** Calibración de la fuerza.

Presión (psi)	Fuerza disco en estático (N)	Fuerza disco en Movimiento (N)
5	20	90
6	24	95
7	26	105
8	28	111
9	32	122
10	46	130



**Figura 50.** Punto de calibración de la fuerza de 130 N.

### 3.6.2.1.4. Inicio de la prueba

Al tener todos los parámetros asegurados, se procedió a oprimir el botón de “INICIAR” en la pantalla del equipo, inmediatamente, el disco empezó a girar a las revoluciones programadas, la arena cayó entre el disco y la probeta, 3 segundos el cilindro neumático se activó con la fuerza calibrada (Figura 51). El proceso tuvo una duración, lo que indica que se cumplió con la abrasión lineal establecida con en la norma, que es de 1436 m, y se encuentra directamente relacionada con el diámetro del disco y el número de vueltas, y terminó de manera automática con el cilindro desactivado, la detención del disco y el flujo de arena.



Figura 51. (a) Pantalla del proceso en ejecución; (b) Proceso de desgaste G-65.

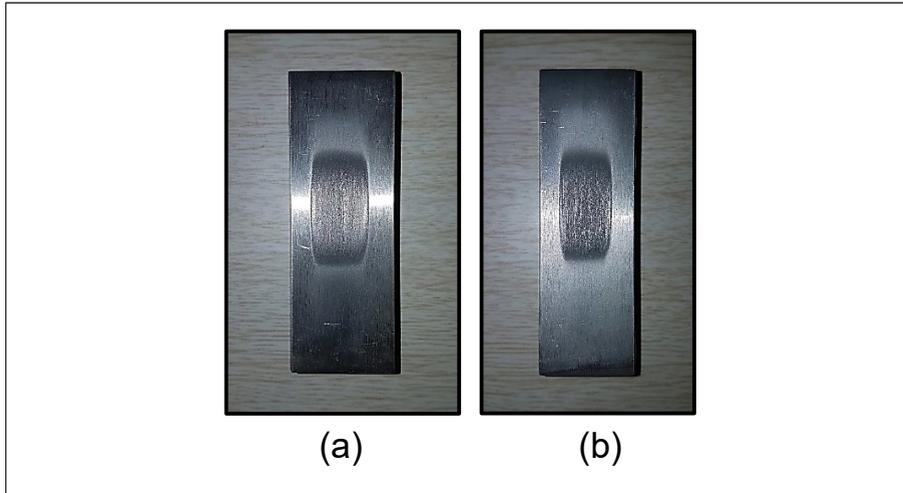
El mismo proceso de desgaste se realizó para el aluminio, la única diferencia, es que, se aplicó el procedimiento E de la norma ASTM G65 (Figura 52).



Figura 52. Elección de procedimiento E para el aluminio.

### 3.6.2.1.5. Resultados

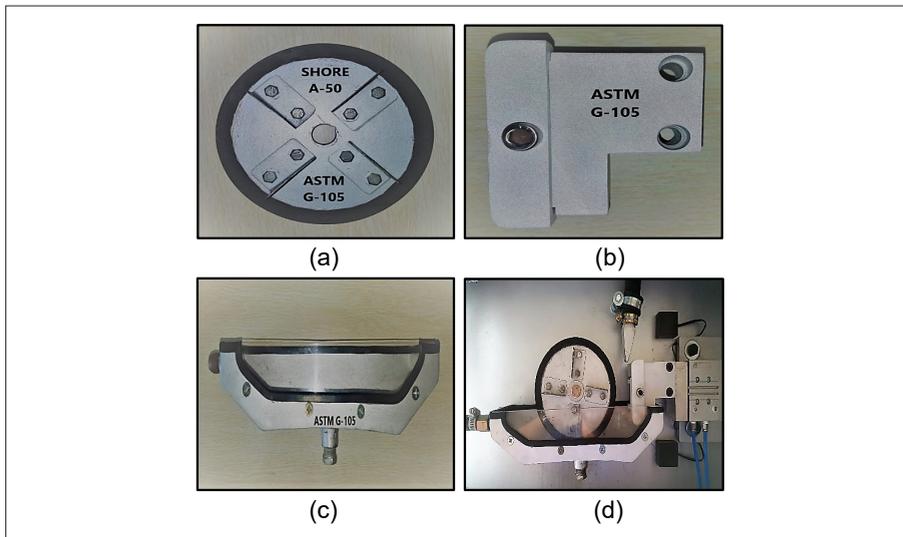
Se obtuvo la huella que se formó en la probeta durante el proceso de desgaste, la cual es uniforme y está lo más centrada posible. Esta huella se ve reflejada en los dos materiales que se pusieron a disposición para esta norma (Figura 53).



**Figura 53.** (a) Acero inoxidable martensítico ASIS 403; (b) Aluminio.

### 3.6.2.2. Montaje de las piezas para la norma ASTM G105

Se realizó el montaje con las diferentes piezas correspondientes a la norma ASTM G105 (Figura 54).



**Figura 54.** (a) Disco de caucho de 177.8 mm; (b) Portaprobetas ASTM G105; (c) Contenedor de mezcla; (d) Montaje completo.



### 3.6.2.2.1. Montaje de la probeta y elección de los ensayos

Una vez instaladas las piezas de la norma, se procedió a colocar la probeta de acero ASIS 4140 para todos los ensayos (Figura 55), los cuales ya tienen programados los parámetros correspondientes, para iniciar el proceso de desgaste, hay que recordar, que, en los 4 ensayos, se manejan los mismos parámetros, lo que cambia es el disco de caucho. Inicialmente para el ensayo 1, se empieza con el disco de dureza shore A50 para eliminar la capa superficial y exponer el material fresco que no se ve afectado por la preparación de la superficie.

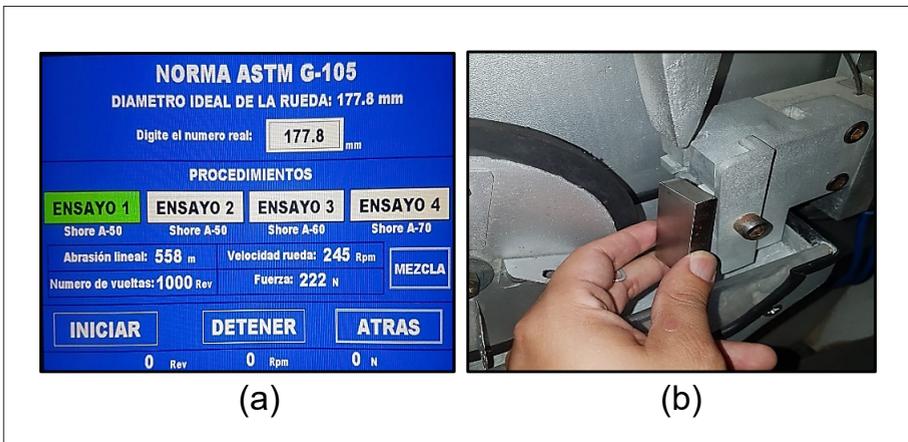


Figura 55. (a) Puesta de la probeta; (b) Elección del ensayo 1.

### 3.6.2.2.2. Realización de la mezcla

La norma ASTM G-105, estipula que se deben tomar 1.500 kg de arena de cuarzo y 0.940 kg de agua a temperatura ambiente para crear la mezcla. La tolva de agua debe tener un nivel de 10 L para realizar el procedimiento y la tolva de arena debe tener un nivel de 15 kg para abastecer la mezcla que dicta la norma. Esta máquina ya tiene programadas las cantidades por medio del tiempo de descarga del agua y de la arena con solo oprimir el botón “MEZCLA” (Figura 56), por lo que solo se debe constatar que las tolvas posean el volumen necesario para realizar todos los ensayos de esta norma. Esta mezcla se desecha al finalizar cada ensayo, y se vuelve a hacer al comenzar el siguiente ensayo.

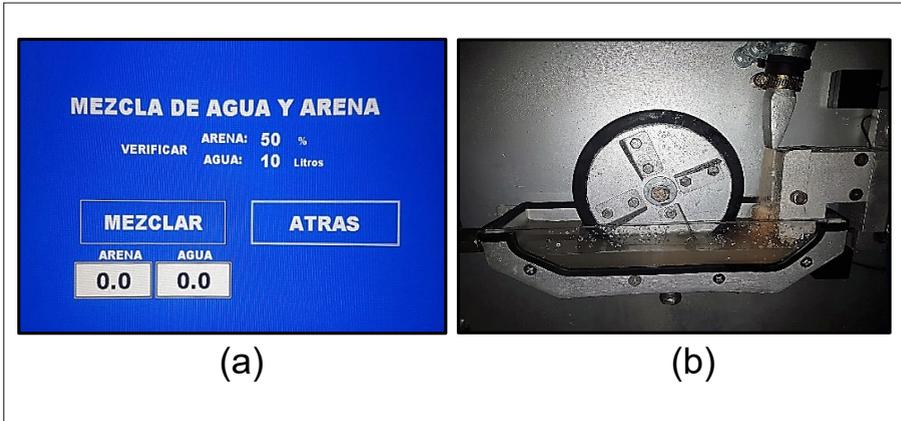


Figura 56. (a) Pantalla de mezcla; (b) Mezcla en el contenedor.

### 3.6.2.2.3. Calibración de la fuerza

Esta norma indica que para los ensayos se debe ejercer una fuerza de 222 N (50 Lb) sobre la probeta con el disco en movimiento. Igual como se expuso en la calibración con la norma anterior, el equipo posee un nuevo sistema de presión y fuerza (Figura 57), en donde se deben tomar lecturas con el disco estático y con el disco en movimiento hasta encontrar el punto de equilibrio de la fuerza requerida. Los resultados de esa calibración se ven reflejados en la Tabla 37 y graficados en la Figura 58.

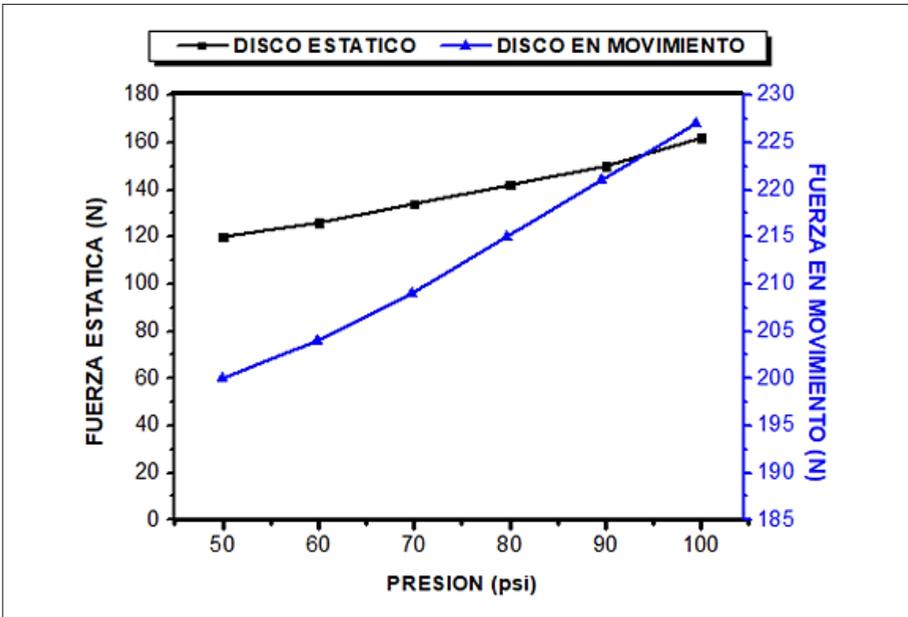


Figura 57. (a) Pantalla de calibración de la fuerza; (b) Probeta sobre el disco estático.



**Tabla 37.** Calibración de la fuerza

Presión (psi)	Fuerza disco enestático (N)	Fuerza disco en Movimiento (N)
50	120	200
60	126	204
70	134	209
80	142	215
90	150	221
100	162	227



**Figura 58.** Punto de calibración de la fuerza de 222 N.

#### 3.6.2.2.4. Inicio de la prueba

Con el botón de “ENSAYO 1” en la pantalla del equipo, y con todos los parámetros asegurados se procedió a oprimir el botón de “INICIAR”, (Figura 59) inmediatamente el disco empezó a girar a las revoluciones programadas, después de 3 segundos el cilindro neumático se activó con la fuerza calibrada. Todo el proceso tuvo una duración en referencia a la abrasión

lineal que es de 558 m, la cual se encuentra directamente relacionada con el número de vueltas, una vez completadas, el proceso terminó de manera automática con el cilindro desactivado y la detención del disco.



Figura 59. (a) Pantalla del ensayo 1 en ejecución; (b) Proceso de desgaste G105.

Para el “ENSAYO 2” se mantuvo el mismo disco A50, para el “ENSAYO 3” se utilizó el disco A60 y para el último “ENSAYO 4” se utilizó el disco con una dureza Shore A70 (Figura 60).

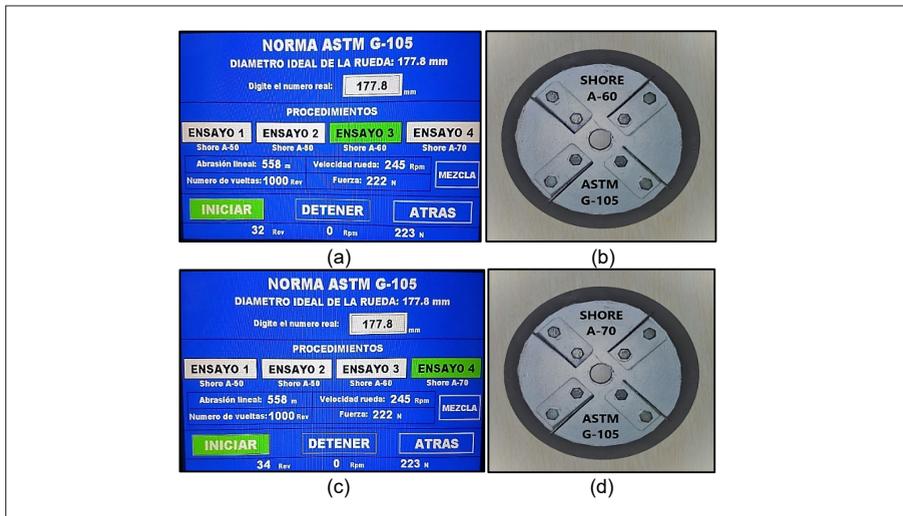


Figura 60. (a) Pantalla del ensayo 3 en ejecución; (b) Disco shore A60; (c) Pantalla del ensayo 4 en ejecución; (d) Disco shore A70.



Durante todos los ensayos, la probeta siempre se colocó en igual posición para seguir actuando sobre la misma huella de desgaste.

### 3.6.2.2.5. Resultados

En la probeta se obtuvo la huella que se formó durante el proceso de desgaste, la cual es uniforme y centrada. Esta huella se ve reflejada en el material AISI 4140, que se puso a disposición para esta norma (Figura 61).



**Figura 61.** Probeta de Acero 4140.

La verificación del equipo finalizó detallando cada proceso de desgaste con las dos normas, y, en las probetas, se evidenció su funcionamiento por medio de la uniformidad de la huella que se generó por el rozamiento del disco cumpliendo el objetivo de estas pruebas.





## 4. Conclusiones

---

- Se diseñó y construyó un tribómetro automatizado para evaluación del desgaste abrasivo en seco y húmedo siguiendo los lineamientos de las normas ASTM G65 y ASTM G105.
- La utilización de SolidWorks, permitió optimizar el diseño estructural del equipo, es una herramienta fundamental para desarrollar proyectos de ingeniería. Se demostró la importancia de los estudios de simulación de las estructuras en el CAD SolidWorks, ya que estos valores garantizan los datos obtenidos en los cálculos, procediendo de igual forma con el estudio de análisis estático y de pandeo en el cual no se encontraron esfuerzos que puedan generar fallos.
- Para máquinas pesadas, es importante la instalación de llantas giratorias en los puntos de apoyo porque favorecen la disminución de las vibraciones que se producen a causa de las revoluciones del motor y brindan la oportunidad de trasladar el equipo para labores de mantenimiento.
- El diseño del sistema del control neumático proporcionó un mejor manejo del proceso de desgaste. Mediante este sistema, se asegura una óptima relación de presión y fuerza sobre la probeta, garantizando ensayos con una alta confiabilidad. Además, se demostró la eficacia del manejo del tribómetro a través de la pantalla del PLC, ya que brindó una manera interactiva de realizar los procedimientos de desgaste automatizados.
- Se validó el funcionamiento del tribómetro por medio del análisis de la uniformidad de las huellas de desgaste en acero inoxidable AISI 403 y aluminios sometidos a la norma ASTM G65 y, en acero AISI 4140 para la norma ASTM G105.

## 5. Bibliografía

---

- [1] P.J. Blau, Oak Ridge. Introduction to adhesion, friction, and Wear Testing Handbook ASTM Vol8. Mechanical Testing and Evaluation. USA 2000 pp 694.
- [2] W. Gutiérrez, J.J. Olaya, M.D.P Torres, “Construcción de un equipo para desgaste abrasivo según norma ASTM G-65” Scientia et Technica Año XX, Vol. 20, No. 3, septiembre de 2015.
- [3] T. A. Stolarski, Tribology in Mashine Design, Oxford Auckland Boston Johannesburg Melbourne New Delhi: Butterworth Heinemann, 1990.
- [4] D.H. Mesa-Grajales, O.F Higuera-Cobos, E.A Ariza-Echeverri. “Fundamentos de tribología, con énfasis en desgaste” Facultad de Tecnología-UTP. Editorial Universidad Tecnológica de Pereira, 2017.
- [5] N. Saka and N. Suh, Fundamentals of Tribology, Massachusetts: MIT Press, 1978.
- [6] K. Ludema, FRICTION, WEAR, LUBRICATION: a textbook in tribology, Boca Raton, New York, London, Tokyo: CRC Press, 1996
- [7] A. D. Acurio Peralta, “Diseño y construcción de un equipo de laboratorio de desgaste abrasivo según normas ASTM G65, ASTM G105 y ASTM B611”. Tesis de grado, Col ciencias e Ingeniería, Prog. Ingeniería Mecánica. Univ. San Francisco de Quito. Ecuador. 2015
- [8] J. L. Soto Trinidad, J.R. Echavarría y G.A. Camilo “Diseño de una máquina para ensayos de abrasión seca y abrasión húmeda”. Eleventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology. August 14-16, 2013 Cancun, Mexico.



- [9] J. L. Marulanda, A. Z. Meneses, C. A. Estrada. “Construcción de una máquina para ensayo en desgaste abrasivo; según norma técnica ASTM G-65”. *Scientia et Technica* Año XV, No 41, pp. 373-378, mayo, 2009.
- [10] W. Gutiérrez Quintero, “Resistencia al desgaste abrasivo de recubrimientos producidos por proyección térmica para aplicaciones navales”, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2014.
- [11] F. Romo Aguas, D.J. Ochoa Vanstralhen, “Implementación de un equipo para la evaluación de la resistencia al desgaste abrasivo según norma ASTM G-65” Fac. de Ingeniería, Prog Ingeniería Mecánica. Universidad del Atlántico de Barranquilla. Colombia. 2018.
- [12] J. Hugh. *Automating Manufacturing Systems with PLC's. Version 5.0.* 2007. p. 20.
- [13] C. Smith. *Control Automático de Procesos. Teoría y Práctica.* México D.F.: Ed. Limusa, 1991. p. 19.
- [14] ASTM International, *ASTM G40-22a Standard Terminology Relating to Wear and Erosion*, West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International, 2022.
- [15] S. F. Uribe “Diseño y fabricación de una máquina para ensayo de desgaste abrasivo según lineamientos de la norma ASTM G-65”, Fac. de Ingeniería Mecánica. Universidad Santo Tomas. Bogotá. 2018.
- [16] O. F. RODRIGUEZ, “Calidad superficial: Rugosidad, máquinas, métodos y control dimensional del procesamiento”. Escuela de educación técnica (EET), Santa fe, Argentina. 2000.
- [17] O.F Higuera-Cobos, I.C. Niño-Camacho, H.A González-Romero, S.A Hurtado-Ferrer, L.F Orozco-Lobo. “Comportamiento microestructural y al desgaste abrasivo de la aleación MOLDMAXX HH (C17200) sometida a ciclos térmicos”. Primera Edición, Editorial Universidad del Atlántico, 2020.

- [18] I. M. Hutchings, Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, Gran Bretaña: Butterworth-Heinemann, 1992.
- [19] ASTM Handbook Vol. 18 Friction, Lubrication and Wear Technology, ASM International.
- [20] ASTM International, ASTM G190 - 15 Standard Guide for Developing and Selecting Wear Tests, West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International, 2015.
- [21] ASTM International, ASTM G65 - 00 Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber, West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International, 2000.
- [22] ASTM International, ASTM G 105 – 02 Standard Test Method for Conducting Wet Sand/Rubber Wheel Abrasion, West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International, 2007.
- [23] ASTM International, ASTM B611- 13 Standard Test Method for Determining the High Stress Abrasion Resistance of Hard Materials, West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International, 2013.
- [24] J. Aguilar, Desarrollo de un prototipo tribológico húmedo funcional para pruebas de abrasión en un tribosistema acuoso, Instituto politécnico nacional, agosto del 2002.
- [25] J. D. Pérez Quiroga, Estudio de los parámetros de desgaste abrasivo del bronce SAE 40 y SAE 64 bajo la norma ASTM G-65 y su influencia en la pérdida de volumen., Ambato: Universidad técnica de Ambato, 2014.
- [26] American Welding Society, Código de soldadura estructural - acero, Miami: American Welding Society, 2015.
- [27] M. Medina, Innovación tecnológica para máquina de desgaste abrasivo tipo rueda de caucho y arena seca (ASTM G65), Pereira, Universidad tecnológica de Pereira, 2015.



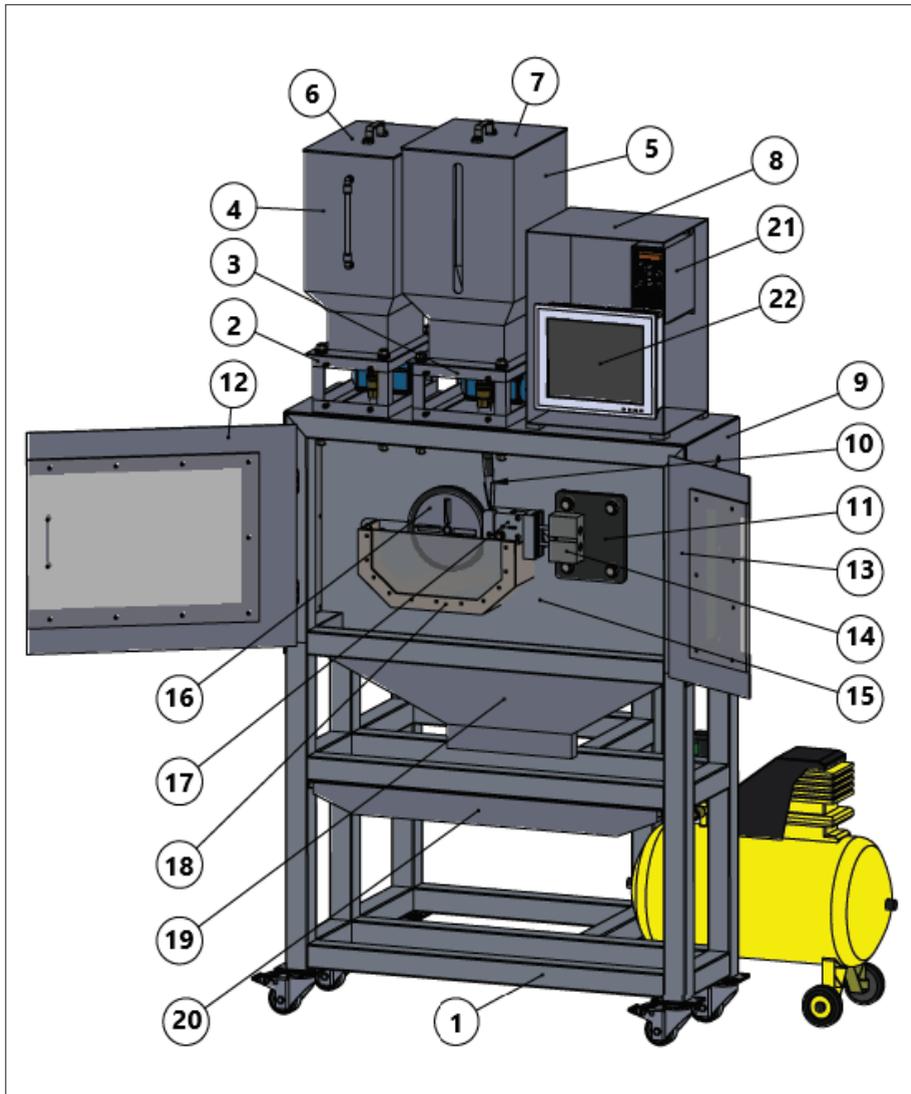
- [28] Finning. “ANÁLISIS DE FALLAS 1; MODULO DE DESGASTE”. Departamento de desarrollo profesional Finning sudamerica.
- [29] Motorex (2022) [online]. Available: <https://www.motorex.com.pe/p/trifasico-ie2-0-75hp-4-polos-weg/>
- [30] China Yumo electric (2016) [online]. Available: <https://www.yumoelectric.com/ZG3-30R-7-NPN-Relay-Output-PLC-HMI-Integrated-XINJE-Touch-Panel-pd94606226.html>
- [31] IEC supply [online]. Available: [https://shop.iecsupply.com/products/134X0711?locale=es\\_ES](https://shop.iecsupply.com/products/134X0711?locale=es_ES)
- [32] Via industrial (2022) [online]. Available: <https://www.viaindustrial.com/fuente-switchheada-riel-din-60w-spb-060-24-autonics/pp/P101724/>
- [33] Didácticas electrónicas [online]. Available: <https://www.didacticaselectronicas.com/index.php/instrumentaci%C3%B3n-industrial/instrumentaci%C3%B3n/sensor-proximidad-metal-autonics-inductivo-magnetico-autonics-detail>
- [34] Amazon (1996 – 2022) [online]. Available: <https://www.amazon.com/-/es/Compresor-2-1-potencia-m%C3%A1xima-Pretul/dp/B07M7F9GYP>
- [35] Soluciones neumáticos e hidráulicos E.I.R.L (2022) [online]. Available: <https://www.hidrauliconeumatico.com/sistema-naumatico.html>
- [36] Direct Industry (2022) [online]. Available: <https://www.directindustry.es/prod/mindman-industrial/product-16430-1977703.html>
- [37] Alibaba (1999 – 2022) [online]. Available: [https://www.alibaba.com/product-detail/SMC-Type-Air-Filter-Regulator-AW4000\\_62375995420.html](https://www.alibaba.com/product-detail/SMC-Type-Air-Filter-Regulator-AW4000_62375995420.html)

- [38] Ventas Radwell (2022) [online]. Available: <https://www.radwell.com/es-ES/Buy/MARSH%20BELLOFRAM/BELLOFRAM/961-112-000/>
- [39] Ardobot Robótica SAS. 2022 [online]. Available: <https://www.ardobot.co/celda-de-carga-50kg.html>
- [40] Amazon (1996 – 2022) [online]. Available: [https://www.amazon.es/dp/B07Z3WPDXT/ref=cm\\_sw\\_r\\_awdo\\_JE8FB3DMQA5FV6WBAXTN](https://www.amazon.es/dp/B07Z3WPDXT/ref=cm_sw_r_awdo_JE8FB3DMQA5FV6WBAXTN)
- [41] Vespo Marketing Associates [online]. Available: [http://vespo.com/08\\_08\\_12%20Uploads/XU2%20Transmitter.htm](http://vespo.com/08_08_12%20Uploads/XU2%20Transmitter.htm)
- [42] Promart Homecenter [online]. Available: <https://www.promart.pe/garrucha-plataforma-doble-rueda-fr-80-kg-2-24223/p>
- [43] Genebre (2022) Ficha técnica [online]. Available: <https://www.genebre.es/10016-v-2027-con-actuador-neumatico>



## ANEXO 1

### Vista frontal de los elementos de la máquina

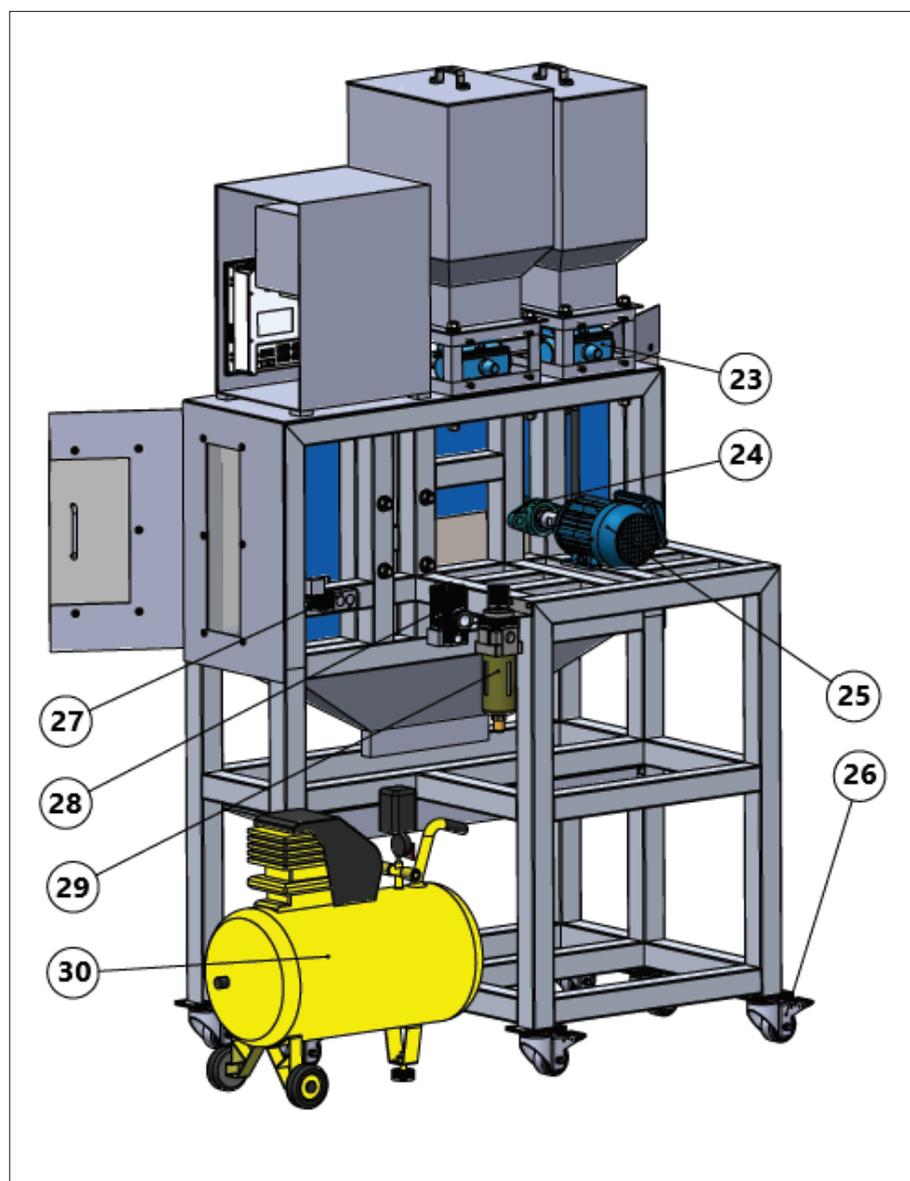


## Lista de elementos frontales

N°	Nombre del elemento
1	Estructura principal
2	Cajuela en perfil L para agua
3	Cajuela en perfil L para arena
4	Tolva de agua
5	Tolva de arena
6	Tapa de tolva de agua
7	Tapa de tolva de arena
8	Cofre eléctrico
9	Ventana lateral
10	Boquilla
11	Placa para cilindro
12	Puerta principal
13	Puerta secundaria
14	Cilindro neumático
15	Placa posterior
16	Disco de caucho
17	Portaprobetas
18	Contenedor (ASTM G-105)
19	Tolva de descarga
20	Bandeja
21	Variador de velocidad
22	Pantalla + PLC



## Vista posterior de los elementos del tribómetro



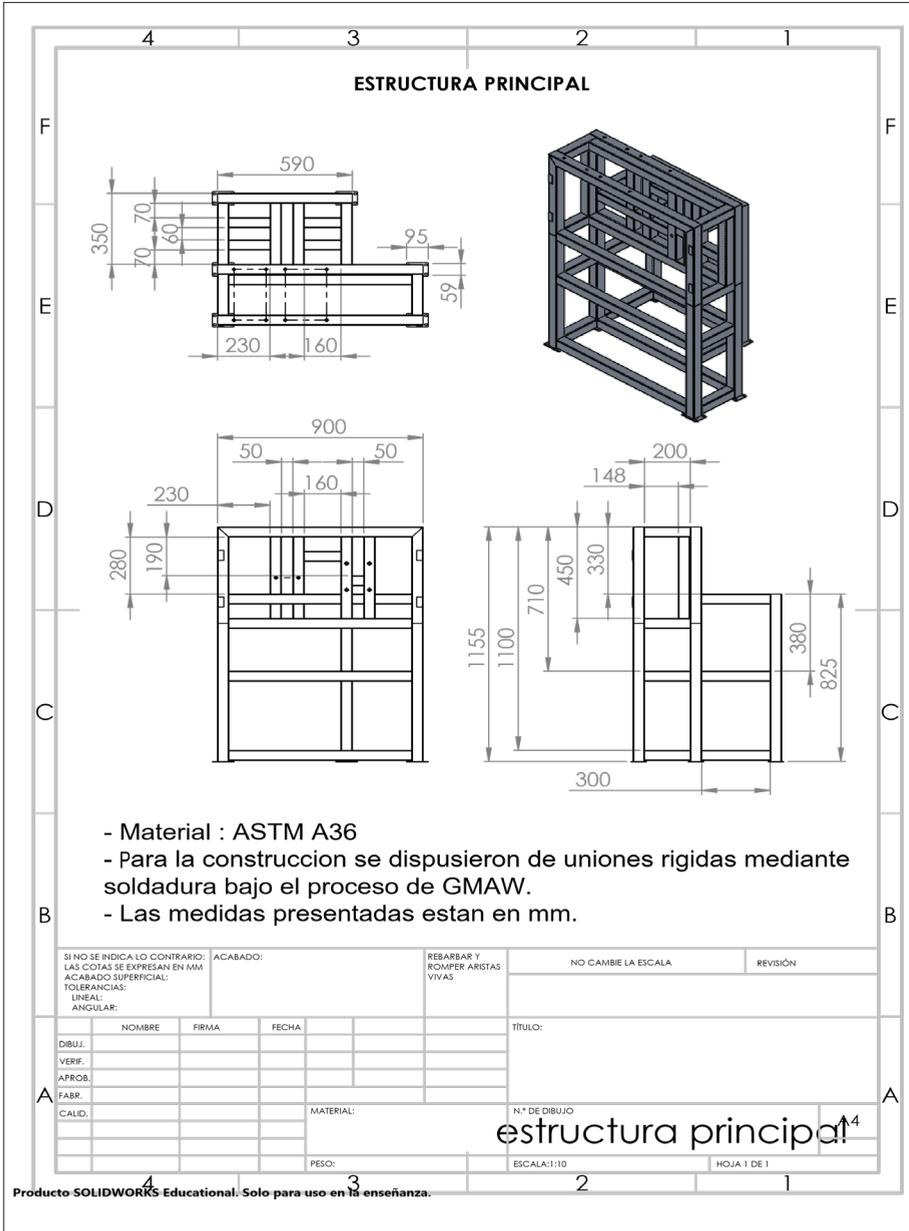
### **Lista de elementos posteriores**

23	Actuador neumático + electroválvulas
24	Chumaceras
25	Motor eléctrico trifásico
26	Ruedas
27	Electroválvula del cilindro neumático
28	Convertidor I/P
29	Filtro y regulador
30	Compresor

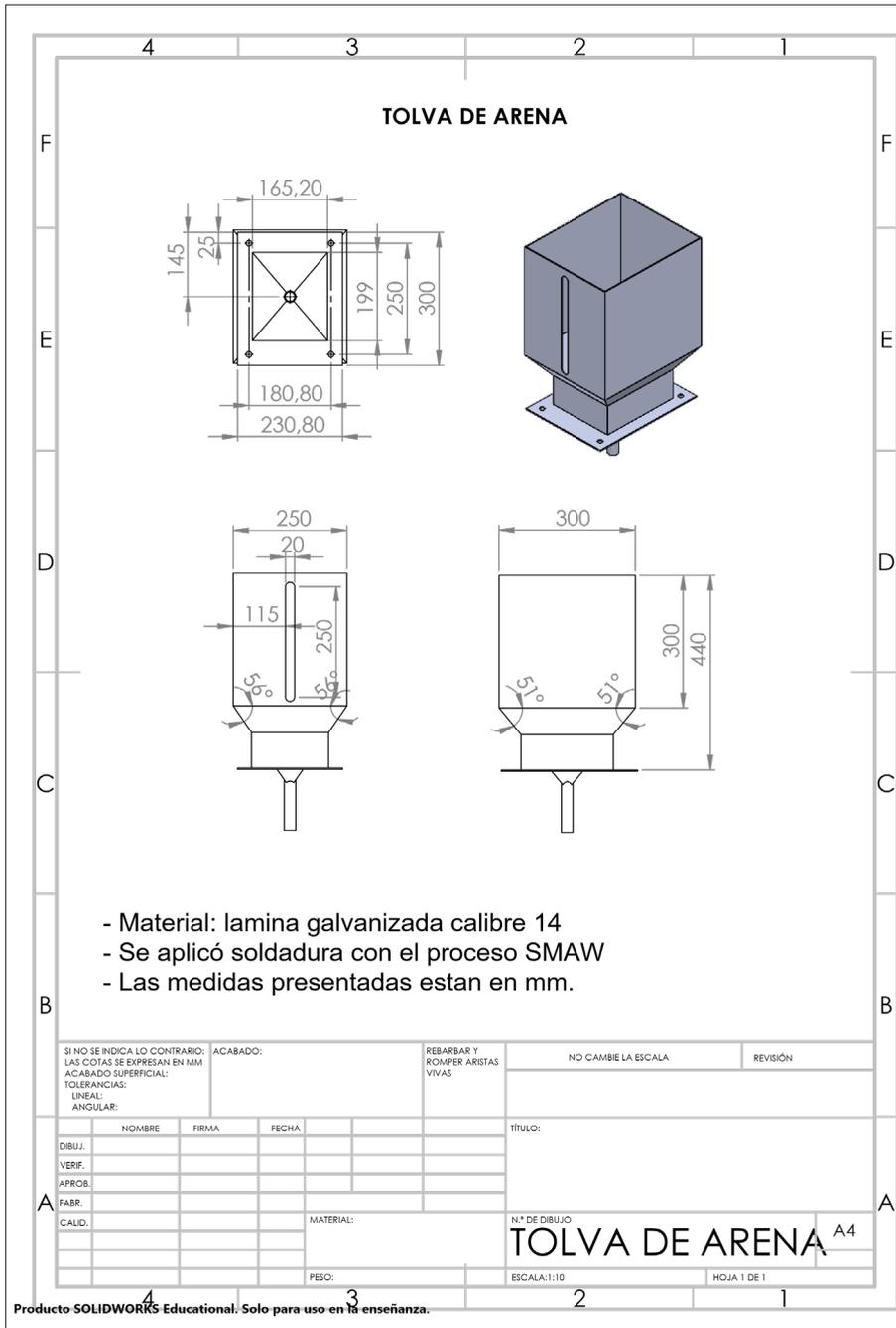


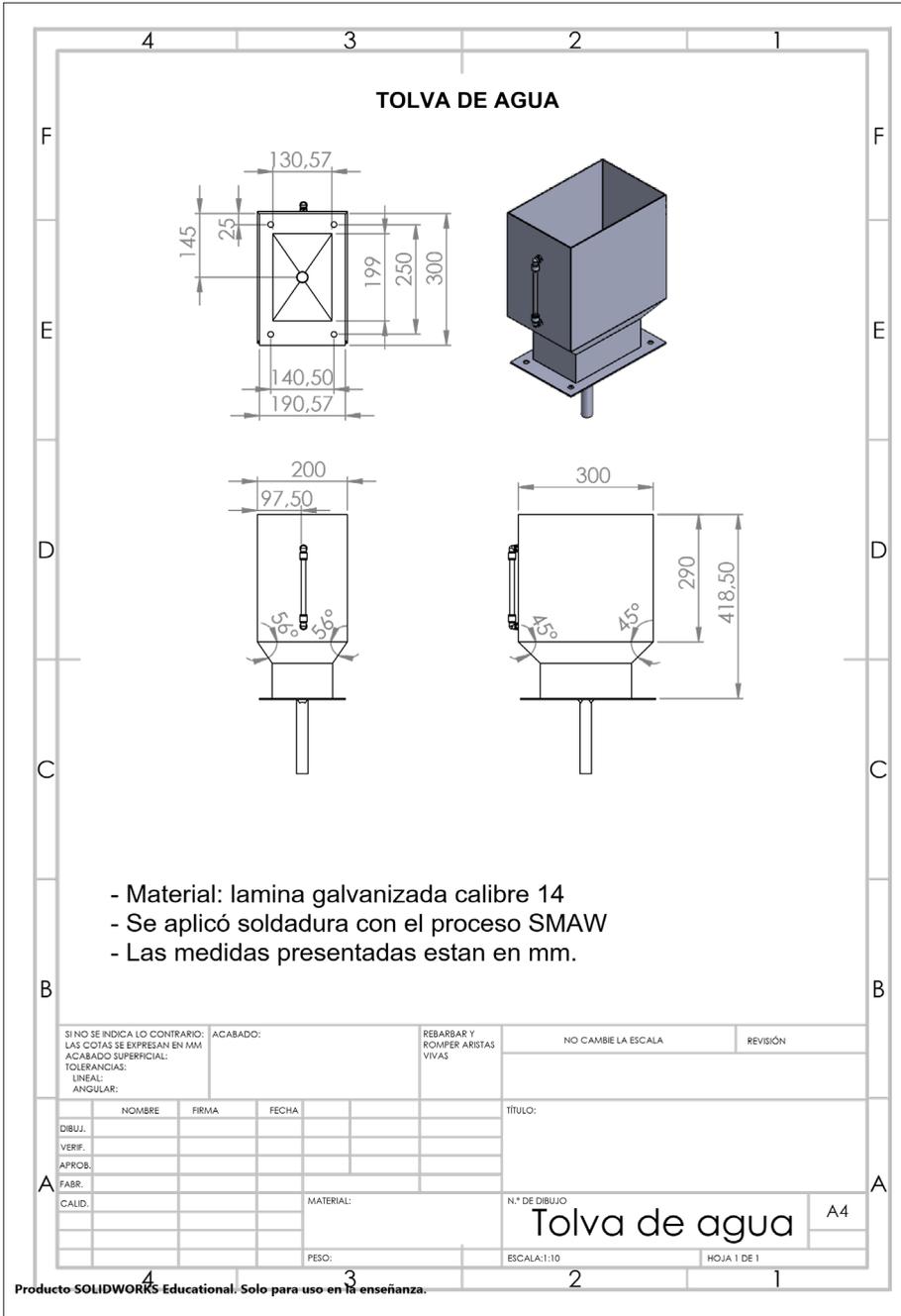
# ANEXO 2

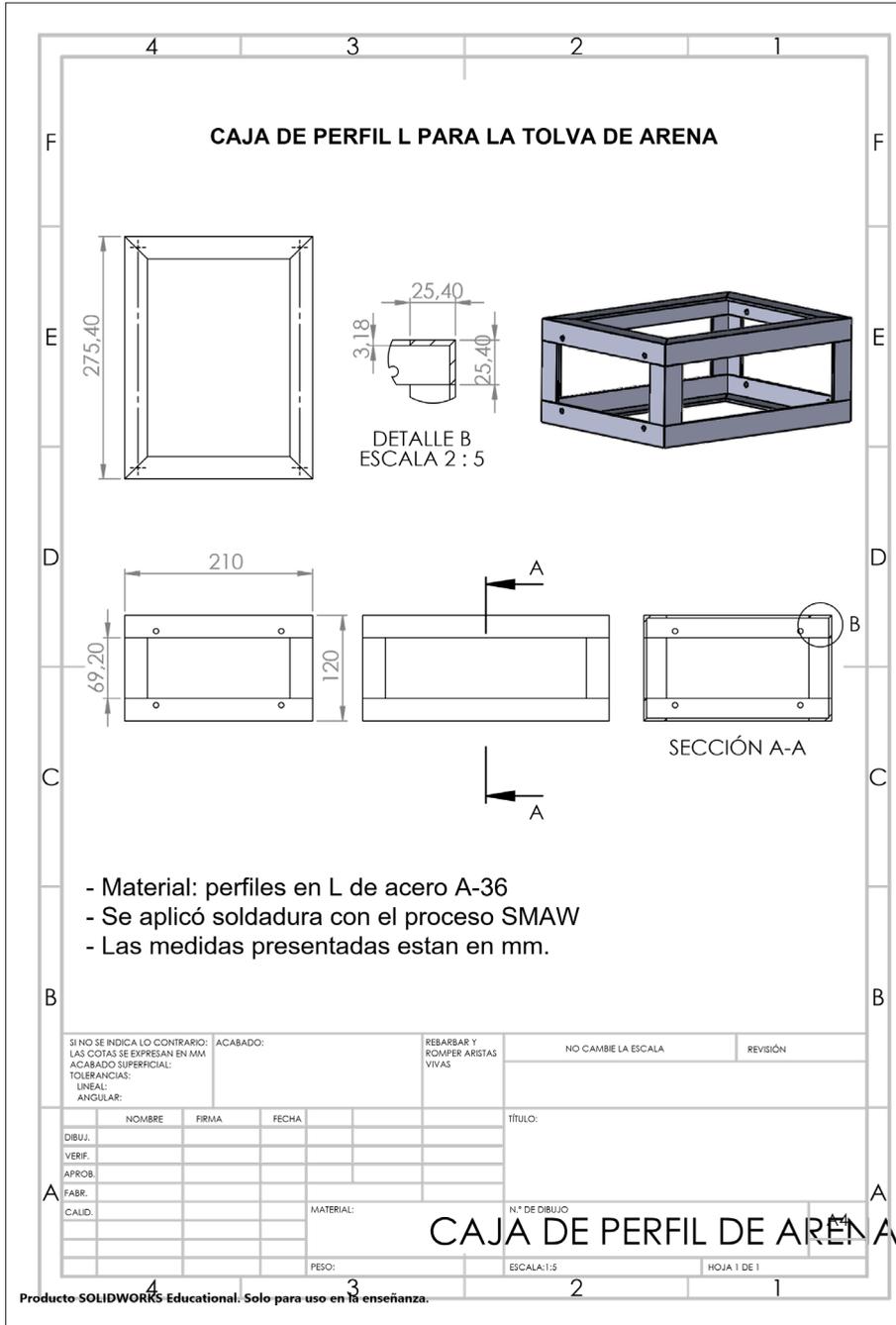
## Planos de los elementos del tribómetro

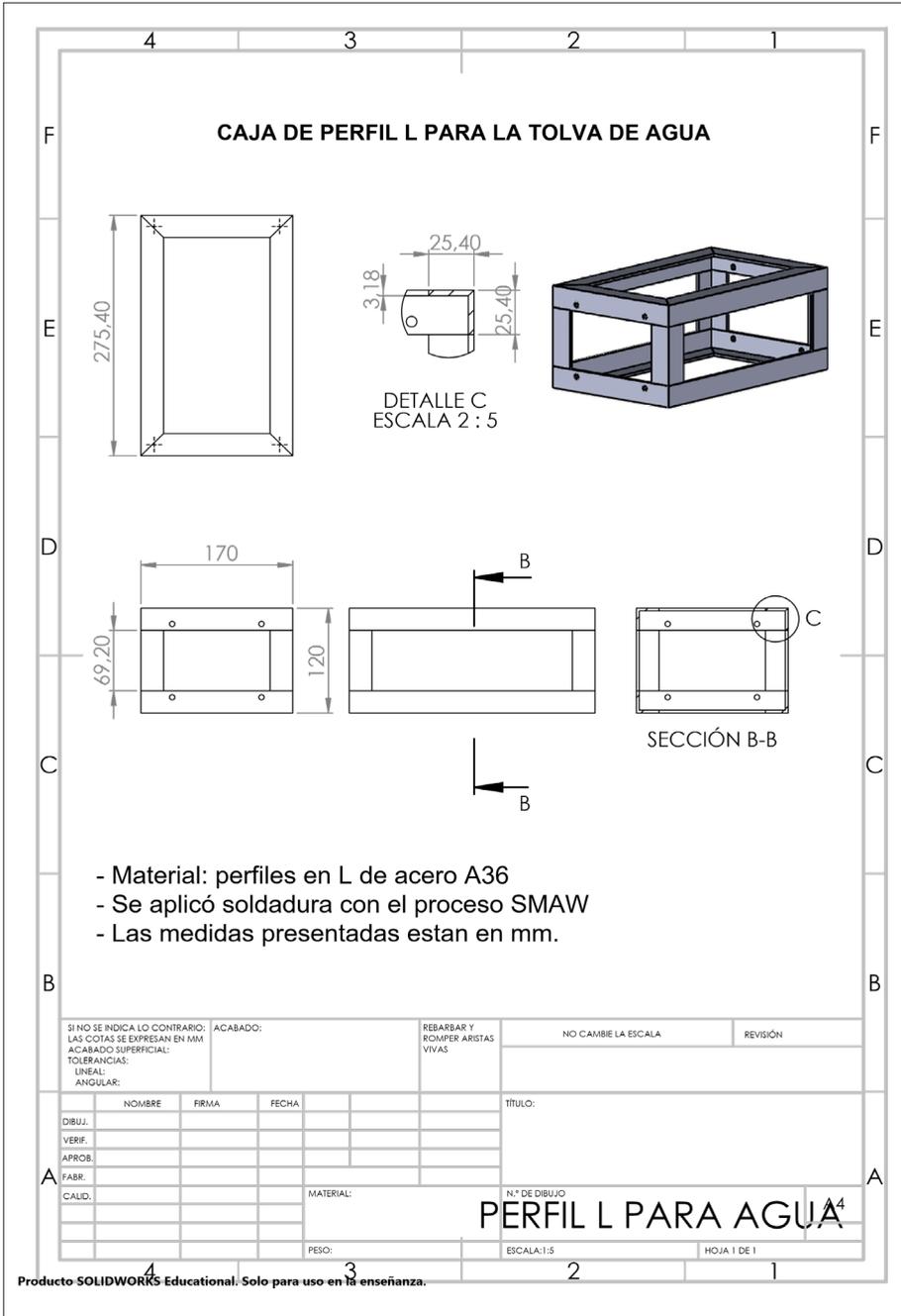


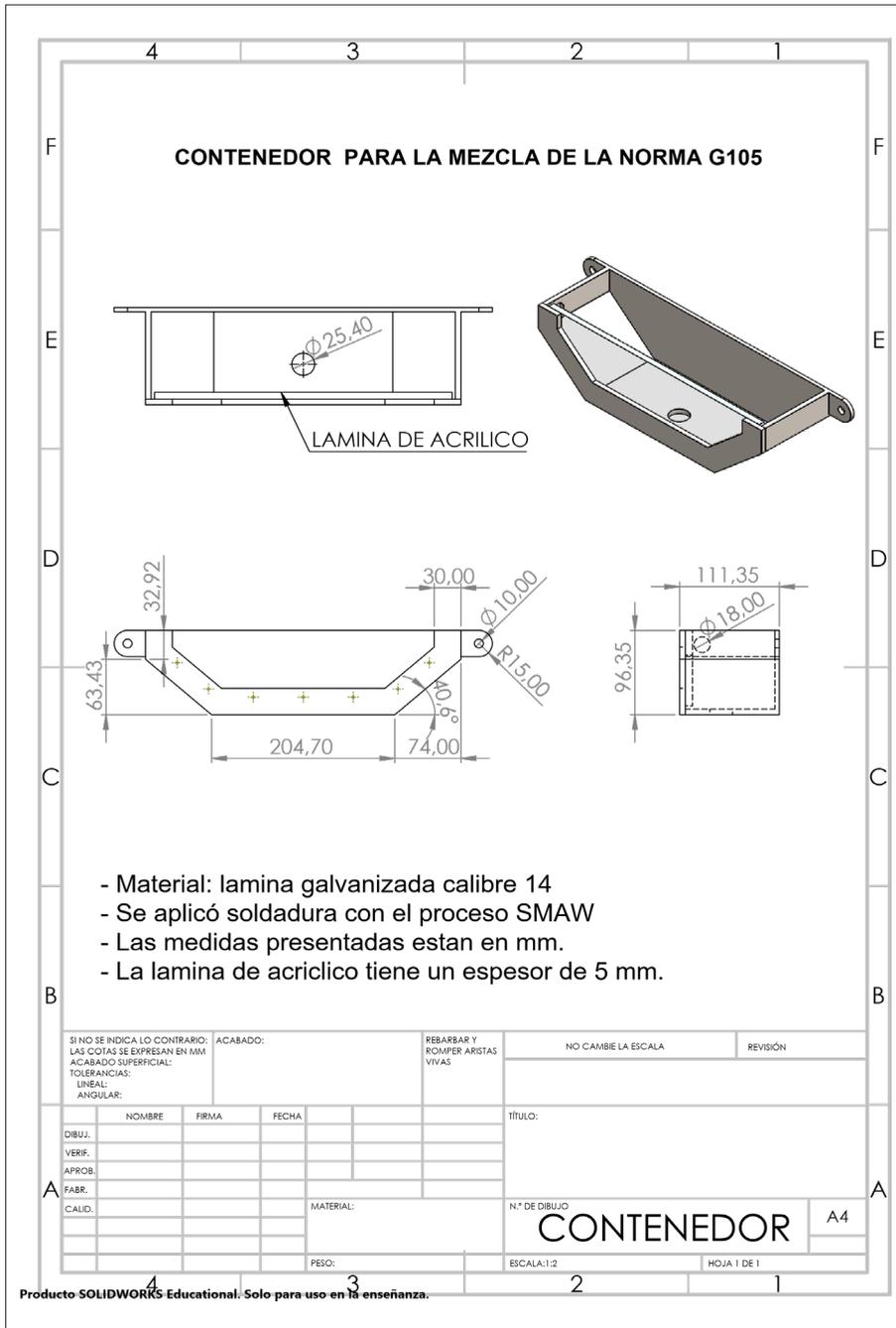
I Implementación de un tribómetro automatizado

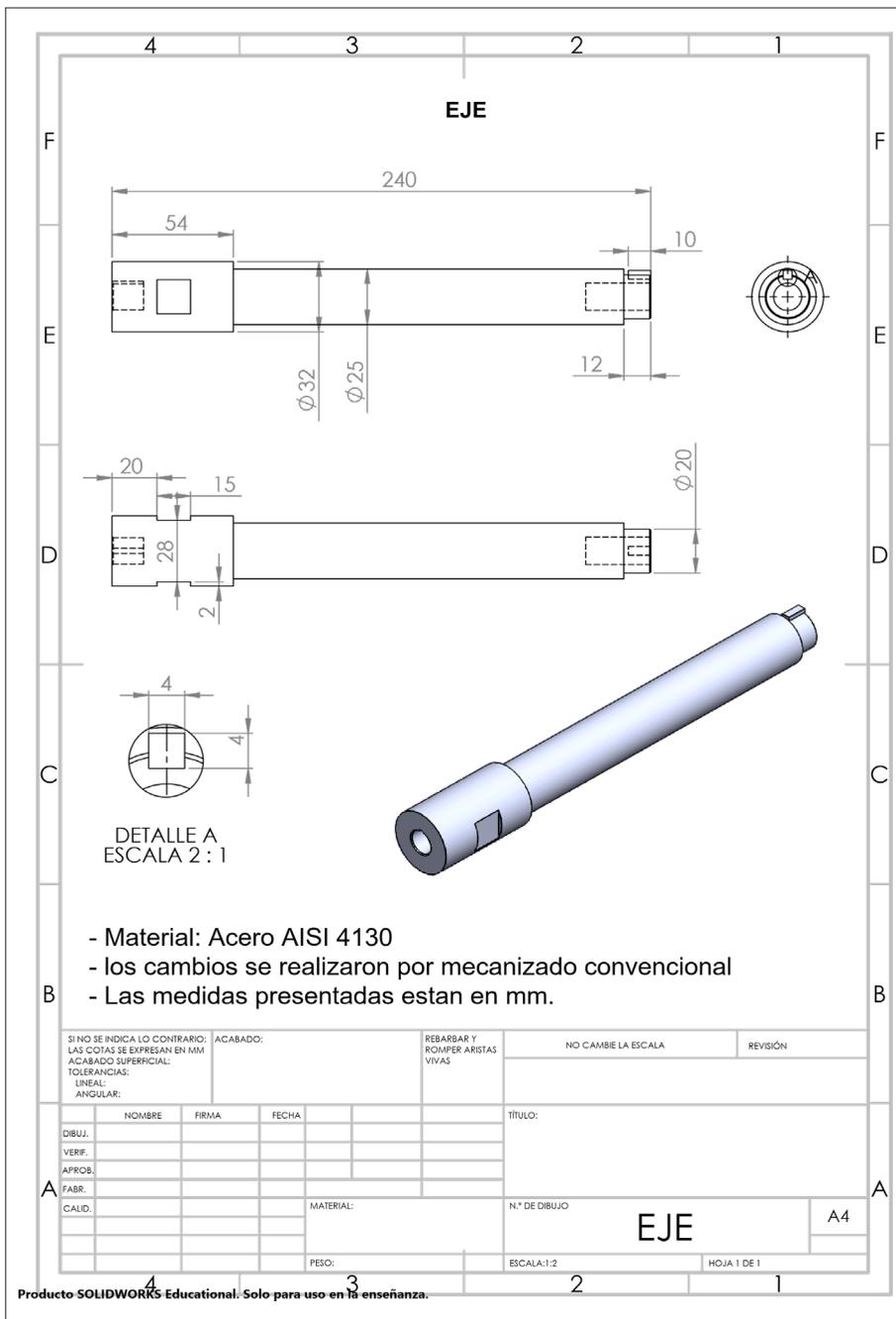


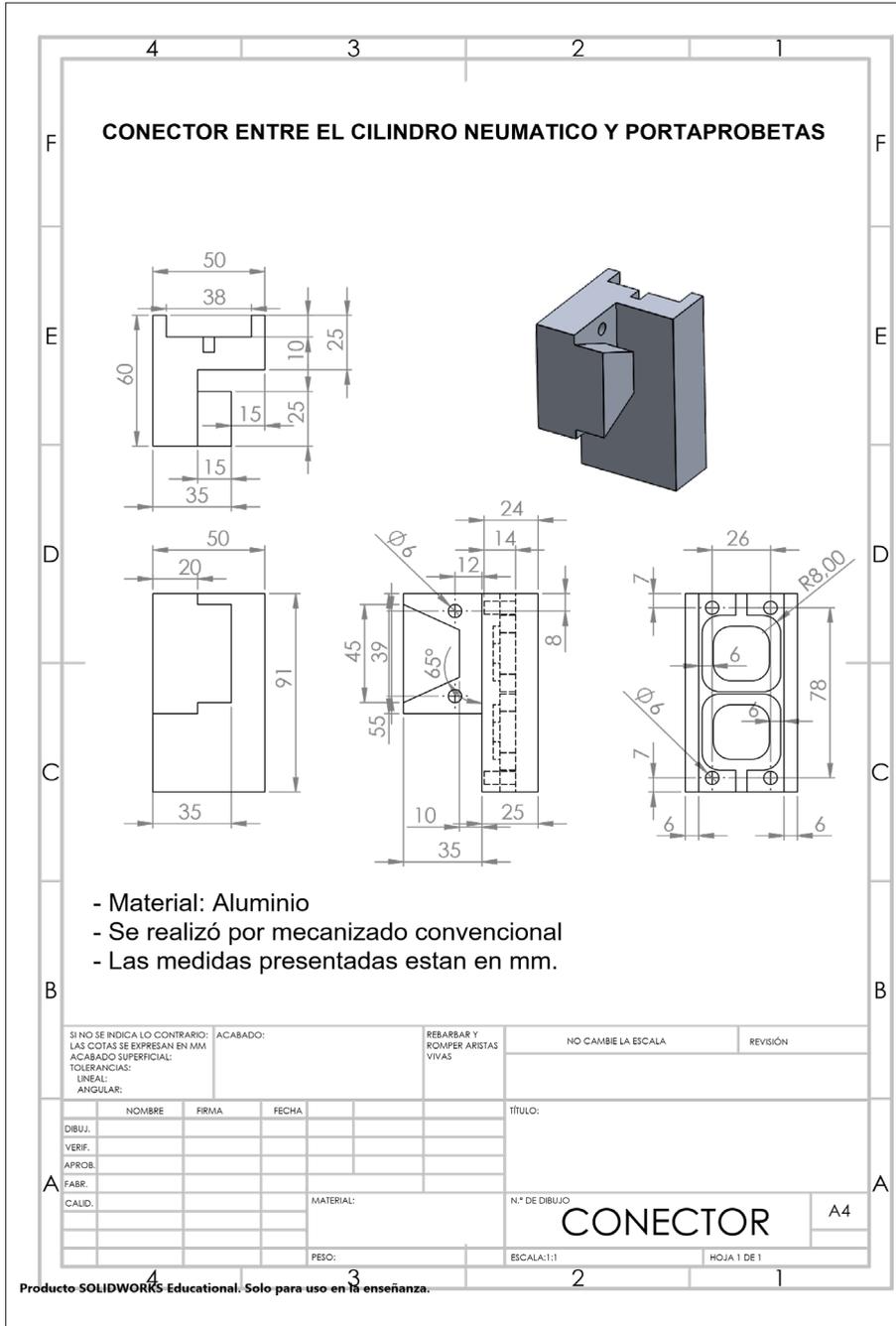




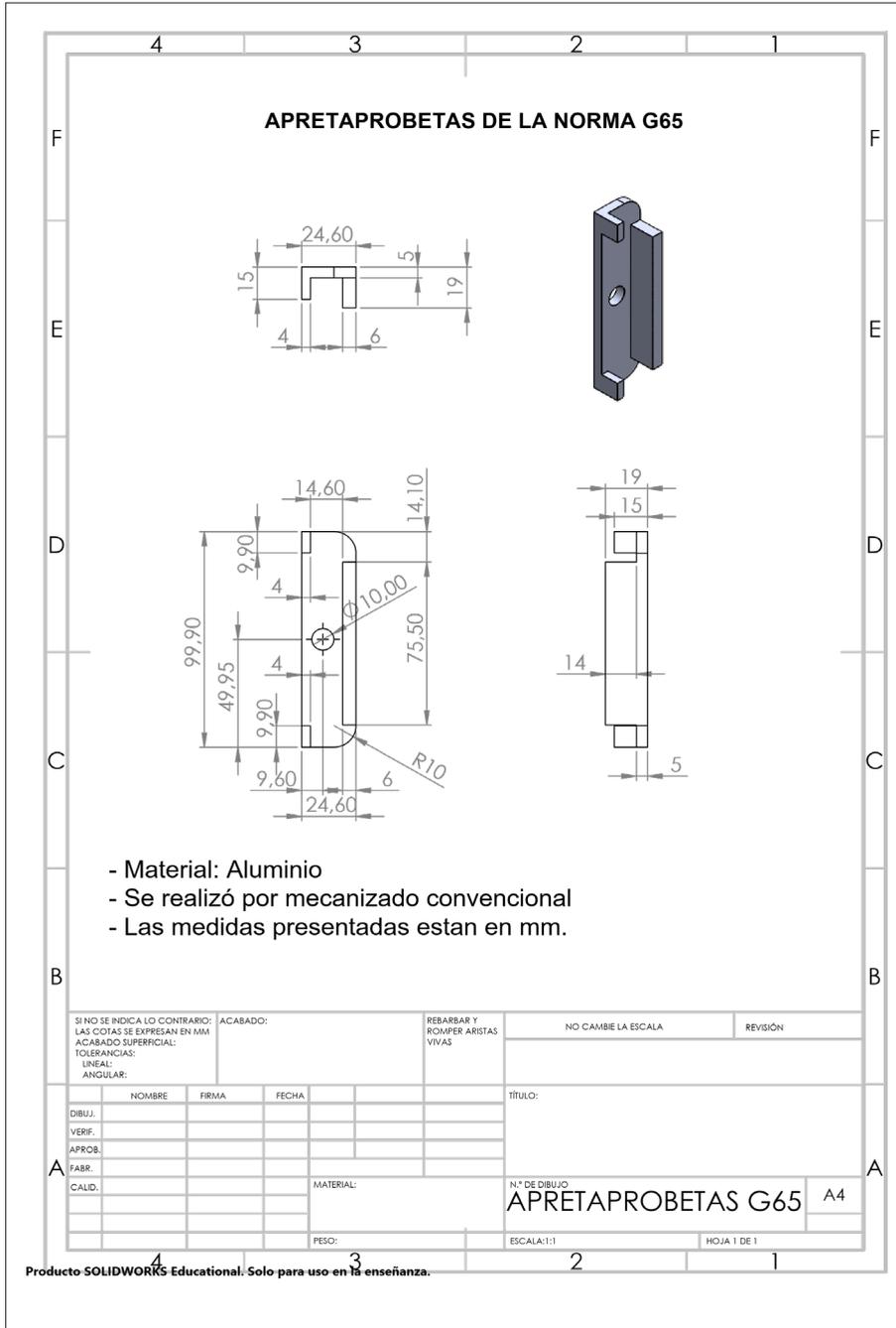


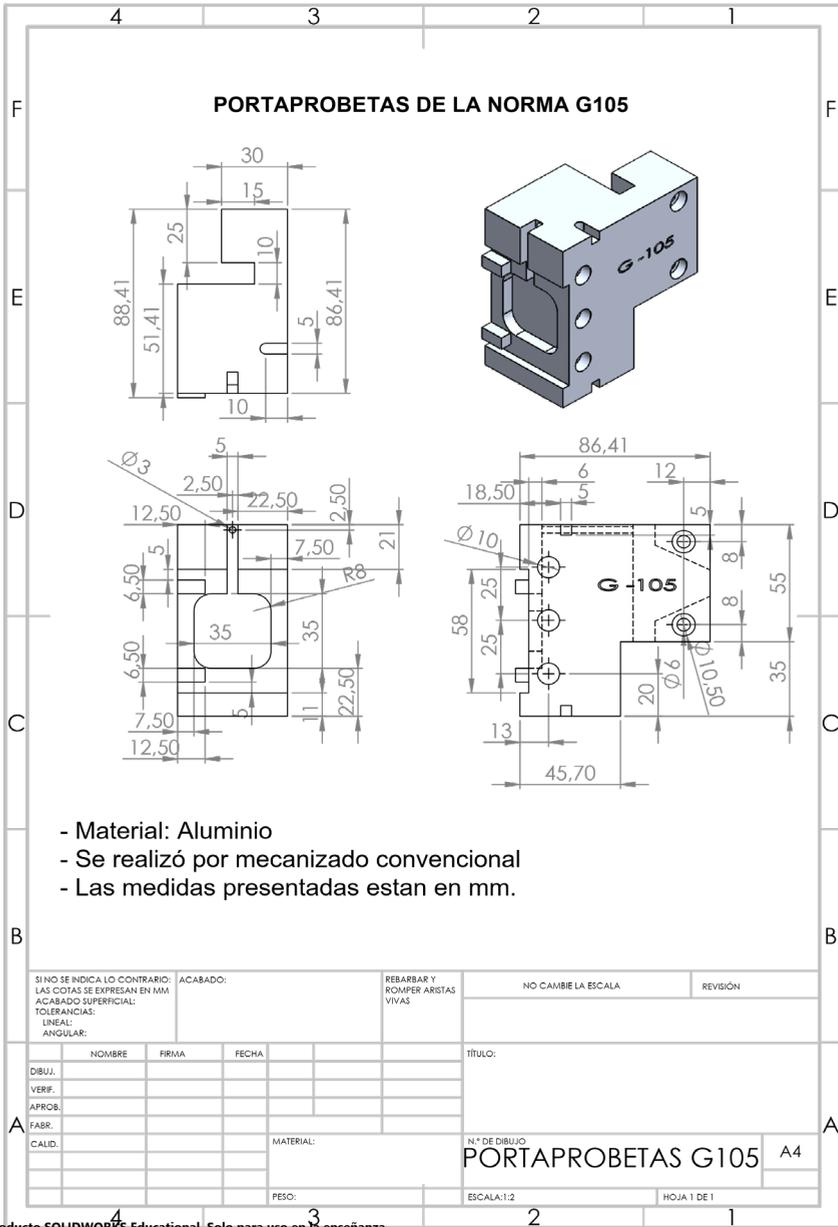


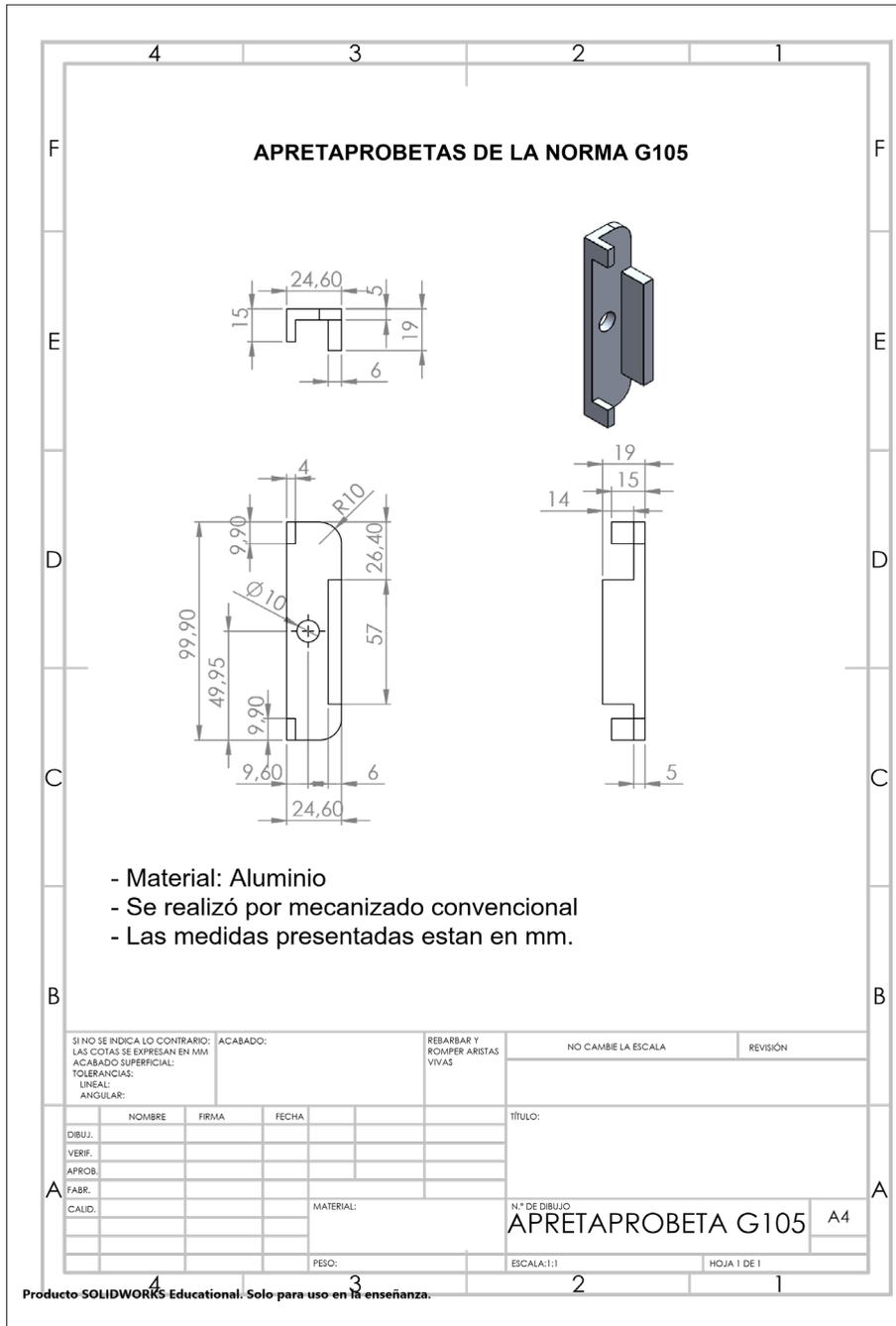


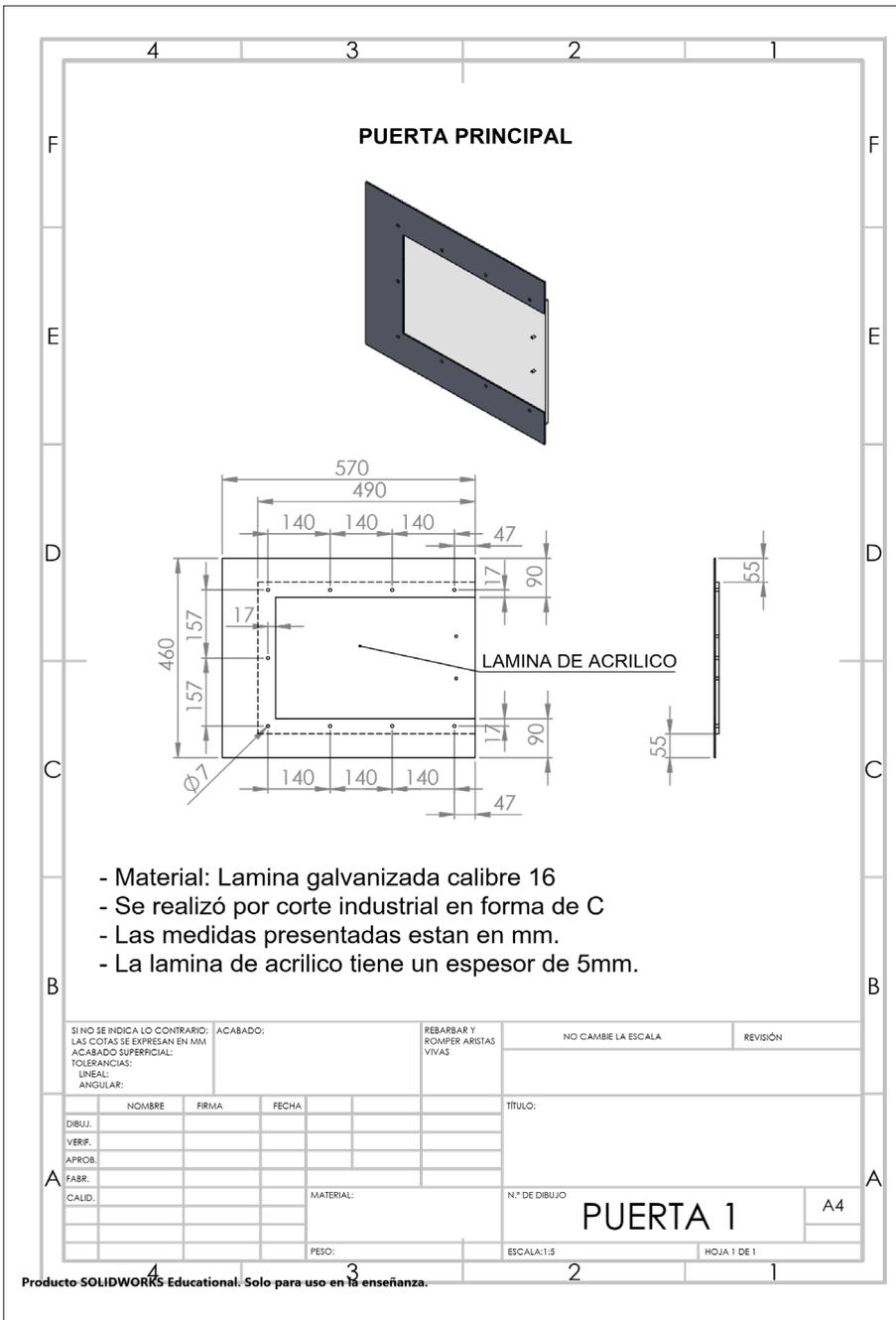




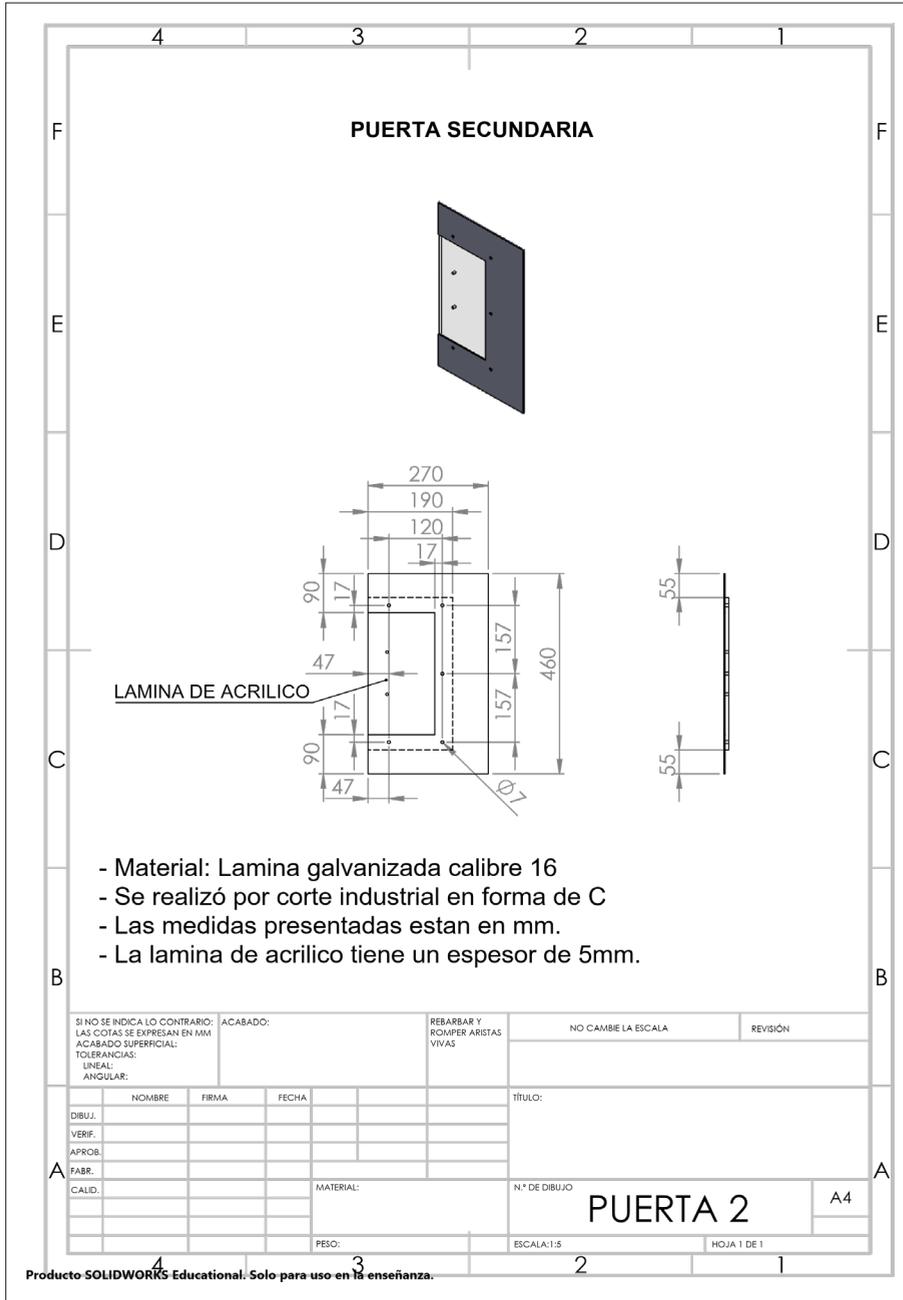


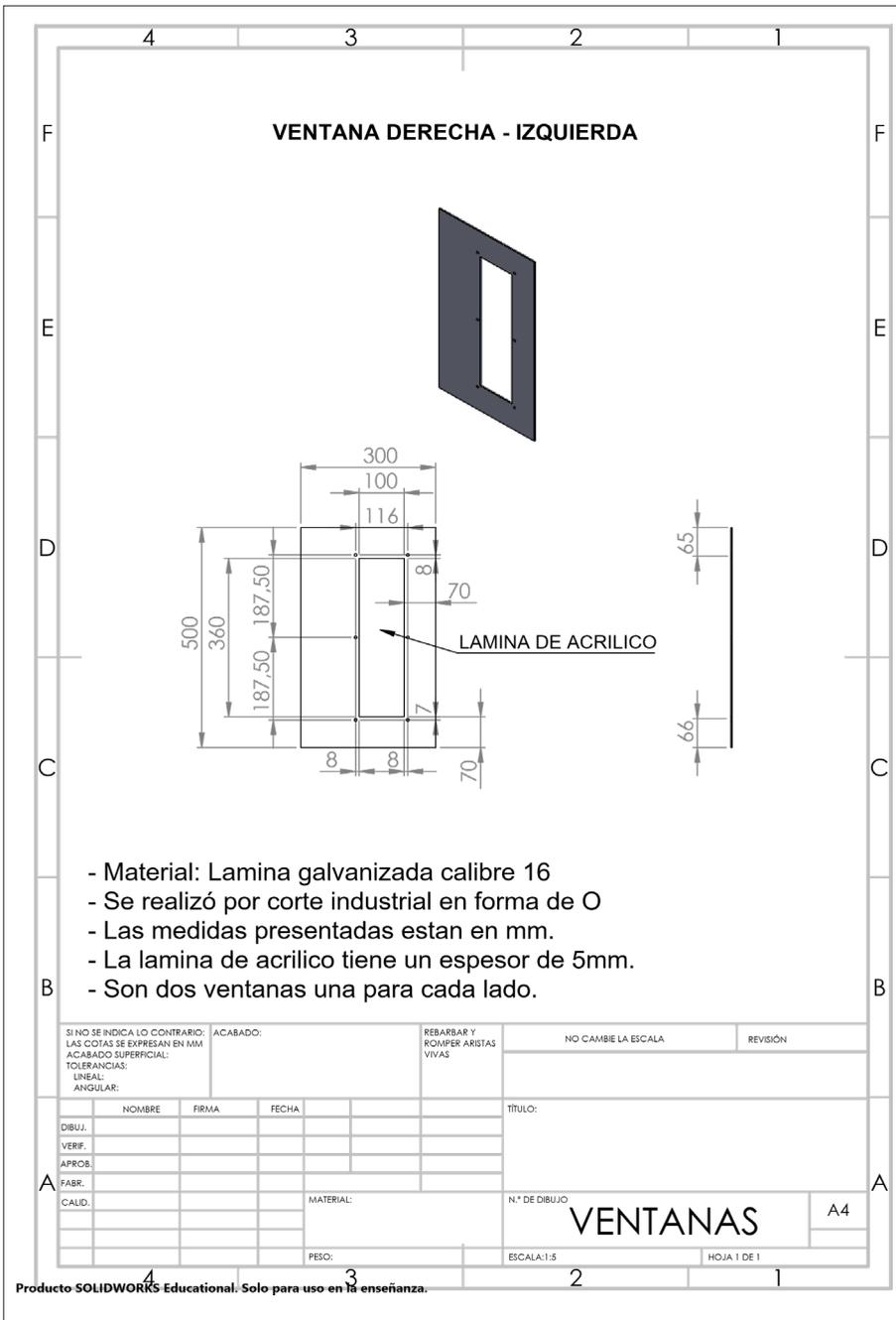




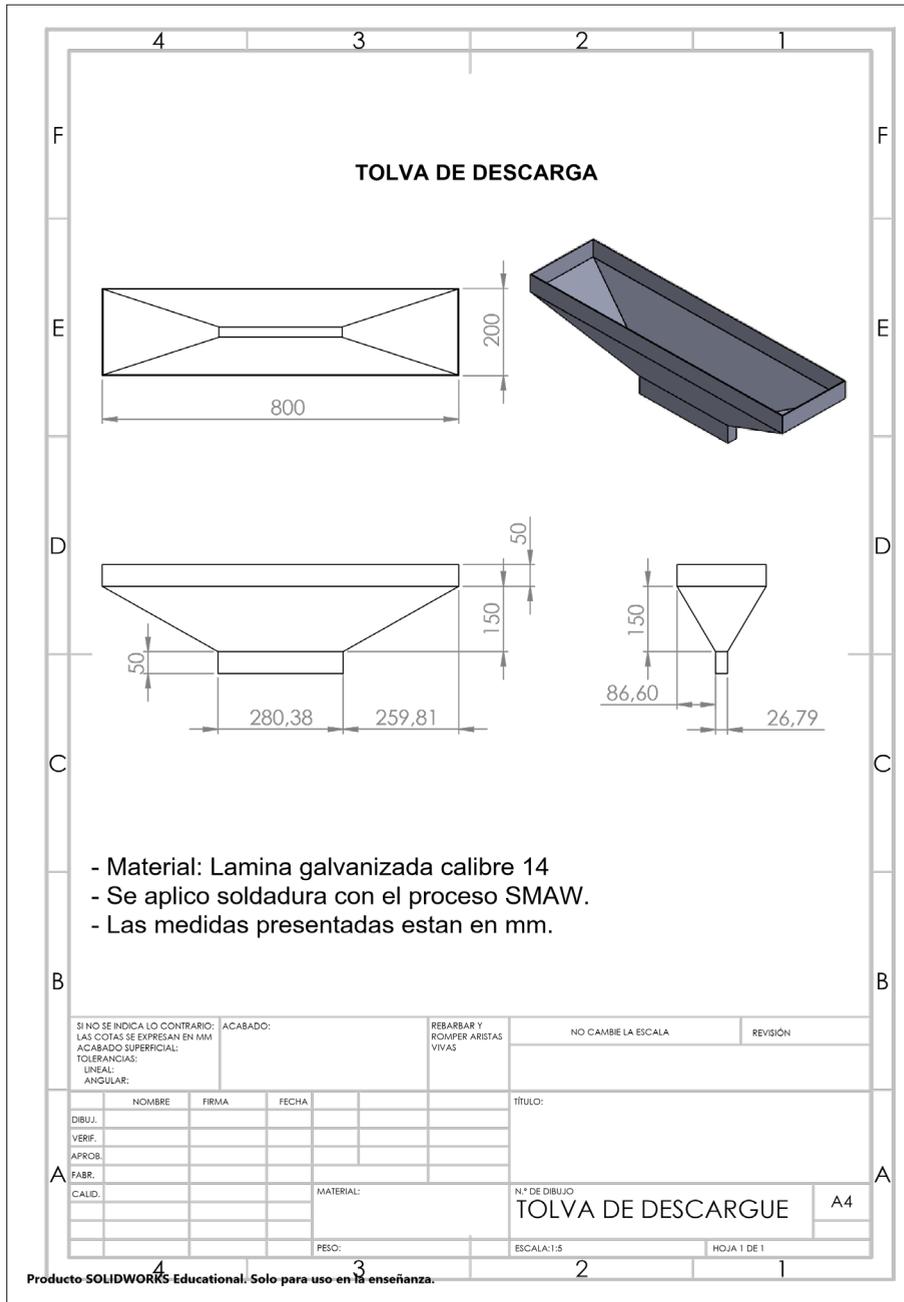


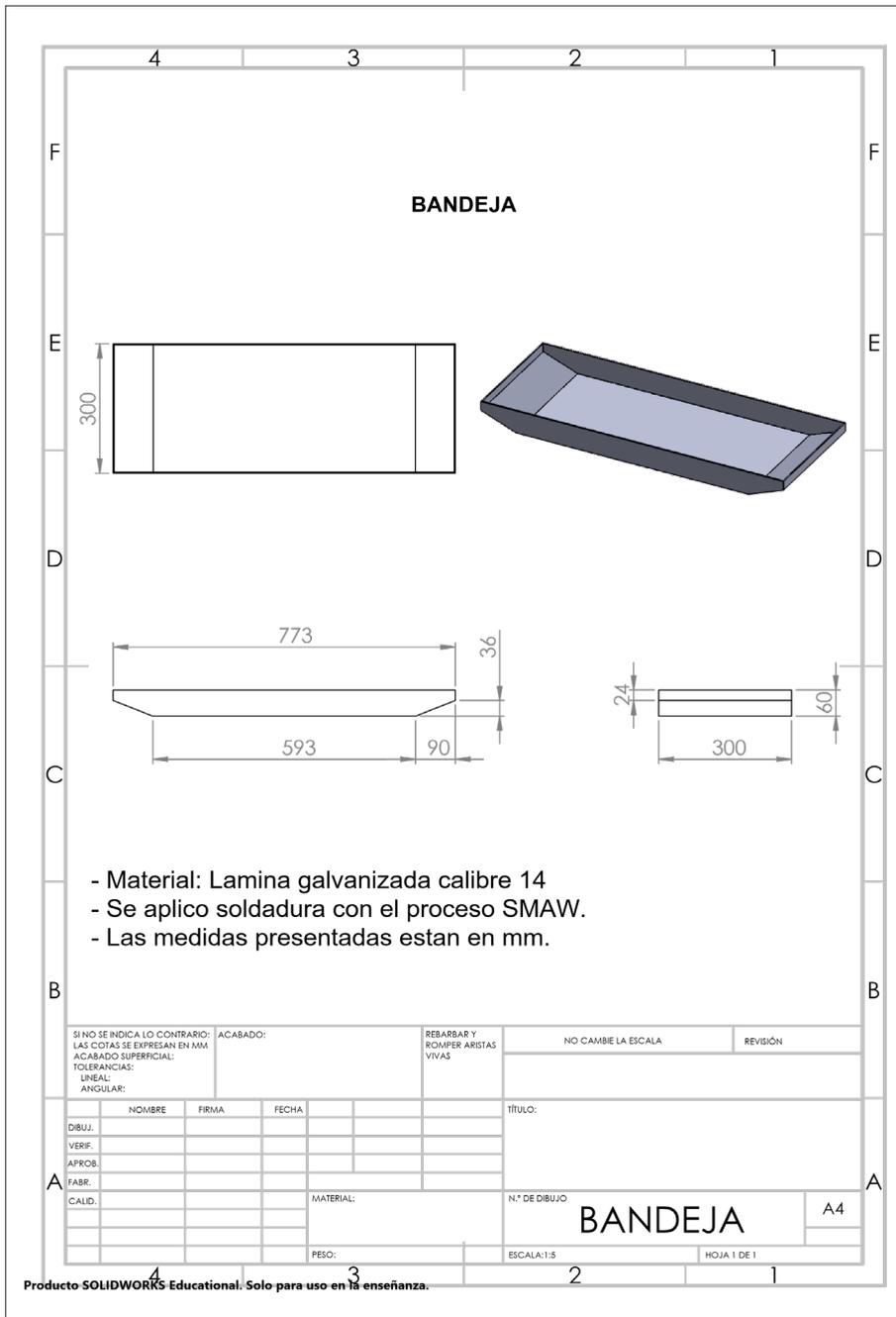
I Implementación de un tribómetro automatizado





I Implementación de un tribómetro automatizado



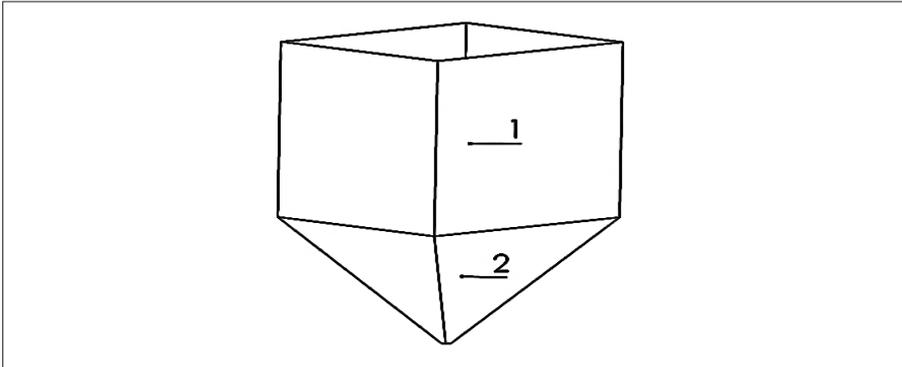


## ANEXO 3

---

### Cálculos de la altura de la tolva de arena

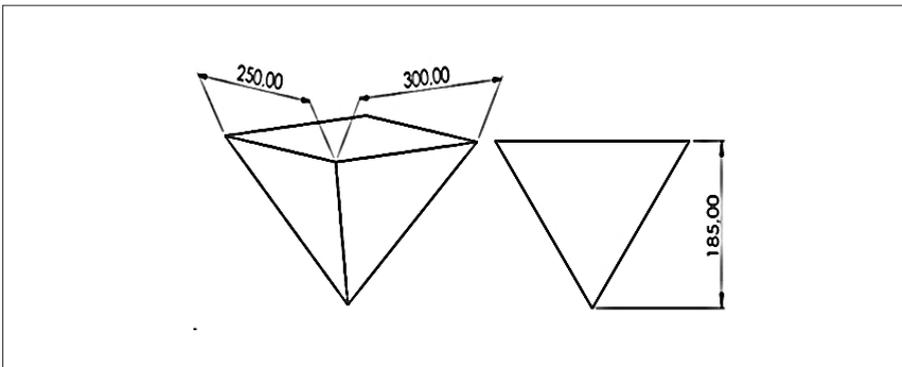
La forma de la tolva fue diseñada de forma paralelepípeda, unida a una forma piramidal como base.



### Diseño de la tolva de arena.

Teniendo las medidas de la parte 2 procedemos hallar su respectivo volumen:

$$a = 250 \text{ mm}; \quad b = 300 \text{ mm}; \quad h = 185 \text{ mm}$$



### Volumen de la tolva de arena.



$$V_2 = \frac{a * b * h}{3} \quad (10)$$

$$V_2 = \frac{(250 \text{ mm}) * (300 \text{ mm}) * (185 \text{ mm})}{3}$$

$$V_2 = \frac{13875000 \text{ mm}^3}{3}$$

$$V_2 = 4625000 \text{ mm}^3$$

$$4625000 \text{ mm}^3 * \frac{1 \text{ L}}{1 \times 10^6 \text{ mm}^3}$$

$$V_2 = 4.625 \text{ L}$$

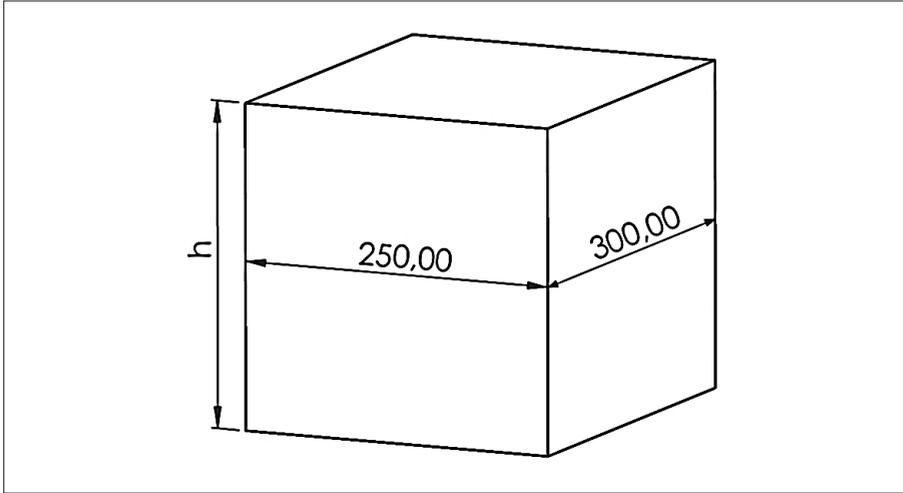
Hallamos el volumen que debemos tener para la parte 1

$$V_1 = 27 \text{ L} - 4.625 \text{ L}$$

$$V_1 = 22.375 \text{ L}$$

Teniendo los valores de la parte 1, hallamos la altura total que debe tener la tolva.

$$a = 250 \text{ mm} ; b = 300 \text{ mm} ; V_1 = 22.375 \text{ L} ; h = ?$$



**Altura de la tolva de arena.**

$$V_1 = a * b * h \quad (11) \quad V_1 = a * b * h \quad (11)$$

$$h = \frac{V_1}{a * b}$$

$$22.375 \text{ L} * \frac{1 \times 10^6 \text{ mm}^3}{1 \text{ L}}$$

$$V_1 = 22375000 \text{ mm}^3$$

$$h = \frac{22375000 \text{ mm}^3}{250 \text{ mm} * 300 \text{ mm}}$$

$$h = 298.33 \text{ mm}$$

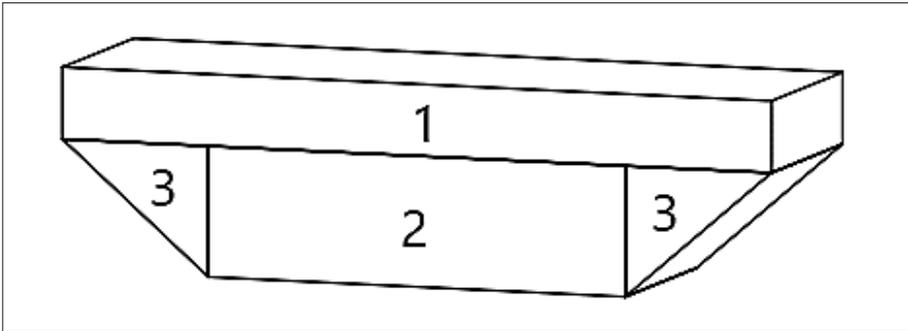


## ANEXO 4

---

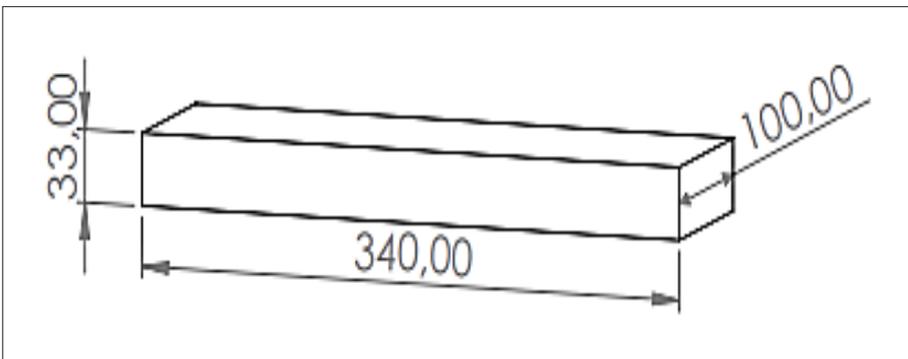
### Cálculos de la altura de la tolva de agua

Empezamos calculando el área del contenedor de la mezcla y para ello se hace por partes.



### Contenedor de la mezcla para la norma ASTM G105.

Se calculó el volumen de la parte 1 donde  $a = 340 \text{ mm}$  ;  
 $b = 33 \text{ mm}$  ;  $h = 100 \text{ mm}$



### Volumen de la parte 1 del contenedor de la mezcla.

$$V_1 = a * b * h \quad (11)$$

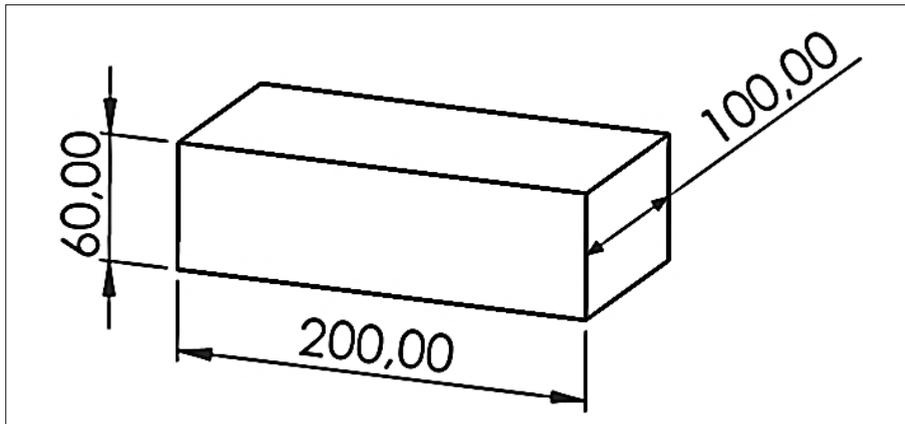
$$V_1 = (340 \text{ mm}) * (33 \text{ mm}) * (100 \text{ mm})$$

$$V_1 = 1122000 \text{ mm}^3$$

$$1122000 \text{ mm}^3 * \frac{1 \text{ L}}{1 \times 10^6 \text{ mm}^3}$$

$$V_1 = 1.12 \text{ L}$$

Se calculó el volumen de la parte 2 donde  $a = 200 \text{ mm}$  ;  
 $b = 60 \text{ mm}$  ;  $h = 100 \text{ mm}$



**Volumen de la parte 2 del contenedor de la mezcla.**

$$V_2 = a * b * h \quad (12)$$

$$V_2 = (200 \text{ mm}) * (60 \text{ mm}) * (100 \text{ mm})$$

$$V_2 = 1200000 \text{ mm}^3$$

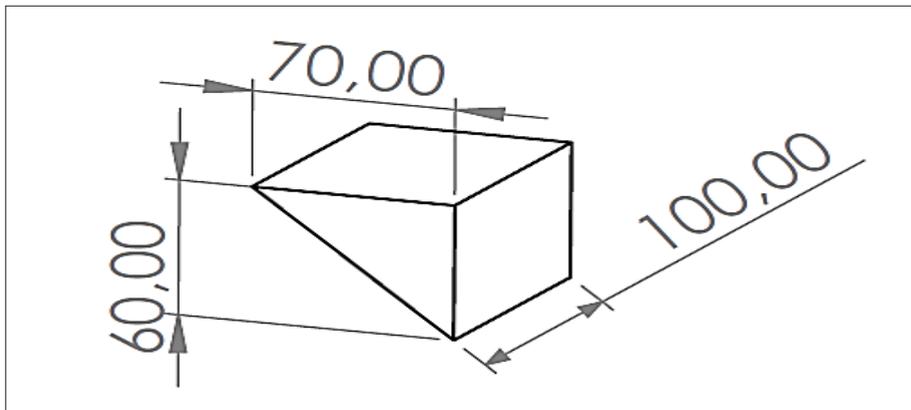


$$1200000 \text{ mm}^3 * \frac{1 \text{ L}}{1 \times 10^6 \text{ mm}^3}$$

$$V_2 = 1.2 \text{ L}$$

Se calculó el volumen de la parte 3 donde

$$a = 70 \text{ mm} ; b = 60 \text{ mm} ; h = 100 \text{ mm}$$



**Volumen de la parte 3 del contenedor de la mezcla.**

$$V_3 = \frac{a * b * h}{2} \quad (13)$$

$$V_3 = \frac{(70 \text{ mm}) * (60 \text{ mm}) * (100 \text{ mm})}{2}$$

$$V_3 = \frac{420000 \text{ mm}^3}{2}$$

$$V_3 = 210000 \text{ mm}^3$$

$$210000 \text{ mm}^3 * \frac{1 \text{ L}}{1 \times 10^6 \text{ mm}^3}$$

$$V_3 = 0.21 \text{ L}$$

Se calculó el volumen total del contenedor de la mezcla:

$$V_T = V_1 + V_2 + 2V_3$$

$$V_T = 1.12 \text{ L} + 1.2 \text{ L} + 2(0.21 \text{ L})$$

$$V_T = 2.74 \text{ L}$$

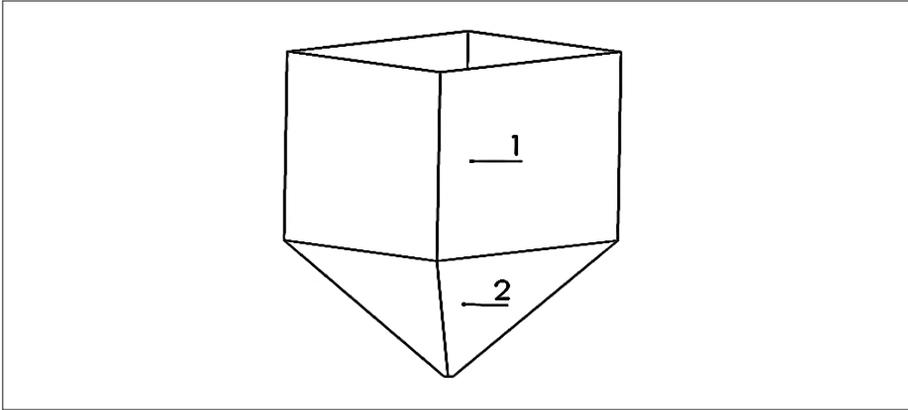
El volumen total del contenedor en cuanto al diseño es ideal, ya que, la norma exige que la cantidad de agua en la mezcla sea de 940 gramos. Esta máquina debe tener la capacidad de presentar como máximo 15 pruebas seguidas. El factor multiplicador por temas de seguridad para contenedores de este tipo de tanque, se encuentra en el orden de 1 a 2, por conservación, por lo que se seleccionó un factor multiplicador de 1.42, y generó un volumen del contenedor aproximado de 20 L.

$$940 \text{ gramos} * \frac{0.001 \text{ litros}}{1 \text{ gramo}} = 0.94 \text{ litros}$$

$$V = 0.94 \text{ L} * 1.42 * 15$$

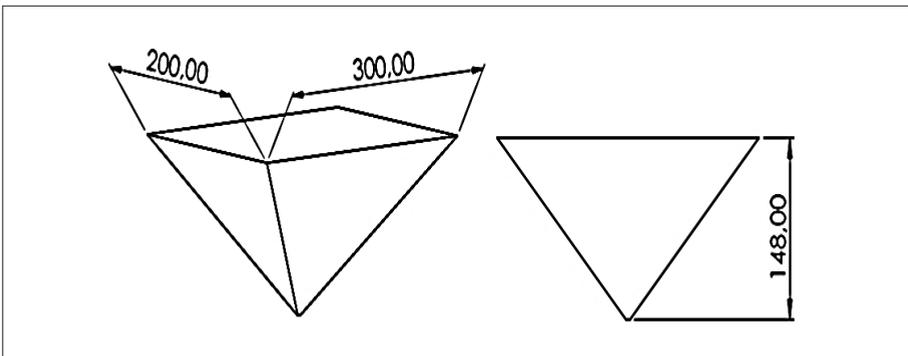
$$V = 20 \text{ L}$$

La tolva de la norma ASTM G105 se trazó con las mismas características que la anterior, pero con diferentes medidas que vemos determinadas en los cálculos de los volúmenes de la parte 1 y 2.



**Diseño inicial de la tolva de agua.**

Se calculó el volumen de la parte 2 del diseño de la tolva de agua:  
 $a = 200 \text{ mm}$ ;  $b = 300 \text{ mm}$ ;  $h = 148 \text{ mm}$



**Volumen de la parte 2. ASTM G105.**

$$V_2 = \frac{a * b * h}{3} \quad (14)$$

$$V_2 = \frac{(200 \text{ mm}) * (300 \text{ mm}) * (148 \text{ mm})}{3}$$

$$V_2 = \frac{8880000 \text{ mm}^3}{3}$$

$$V_2 = 2960000 \text{ mm}^3$$

$$2960000 \text{ mm}^3 * \frac{1 \text{ L}}{1 \times 10^6 \text{ mm}^3}$$

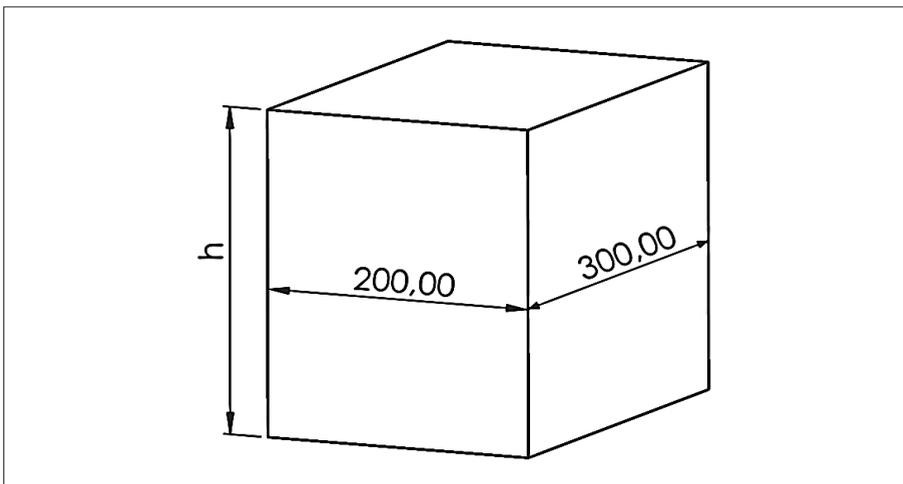
$$V_2 = 2.96 \text{ L}$$

Se halló el volumen que debemos tener para la parte 1 del diseño de la tolva de agua.

$$V_1 = 20 \text{ L} - 2.96 \text{ L}$$

$$V_1 = 17.04 \text{ L}$$

Teniendo los valores de la parte 1, se halló la altura total que debe del contenedor.  $a = 200 \text{ mm}$  ;  $b = 300 \text{ mm}$  ;  $V_1 = 17.04 \text{ L}$  ;  $h = ?$



**Altura total del contenedor ASTM G-105.**



$$V_1 = a * b * h \text{ (15)}$$

$$h = \frac{V_1}{a * b}$$

$$17.04 \text{ L} * \frac{1 \times 10^6 \text{ mm}^3}{1 \text{ L}}$$

$$V_1 = 16980000 \text{ mm}^3$$

$$h = \frac{17040000 \text{ mm}^3}{200\text{mm} * 300\text{mm}}$$

$$h = 284 \text{ mm}$$



Se terminó de editar el libro impreso en mayo de  
2023 en los talleres de Editorial Jotamar S.A.S.  
Tunja, Boyacá, Colombia.

---

## COLECCIÓN INVESTIGACIÓN UPTC. N°. 273

Este trabajo abarca el rediseño realizado a la máquina para la evaluación de la resistencia a la abrasión por vía seca regida por la norma ASTM G65, perteneciente a la Universidad del Atlántico; esta máquina se modificó para implementar la evaluación de la resistencia a la abrasión por vía húmeda, según los lineamientos establecidos por la norma ASTM G105, asimismo, se convirtió en un equipo automatizado por medio de un PLC. La metodología empleada, consistió, en primera instancia, en la realización de pruebas experimentales al equipo antiguo (Norma ASTM G65), con las cuales se detectaron fallas en su diseño y se identificaron las mejoras necesarias para la implementación de la norma ASTM G105, se determinaron los elementos principales para instalar el control del proceso de forma automatizada. Luego, se realizó un diseño conceptual que permitió seleccionar la mejor opción para la fabricación de la estructura, posteriormente, se realizaron simulaciones en el software SolidWorks, con el fin de verificar los elementos críticos de la máquina, sus cargas permisibles, validar las deformaciones, y conocer el factor de seguridad.

