



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

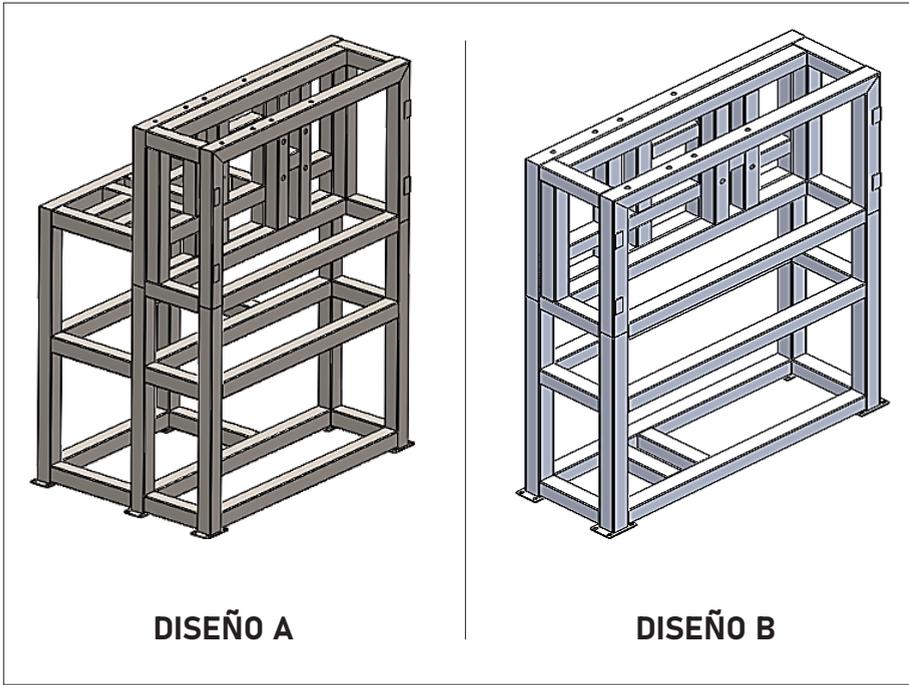


Figura 20. Propuestas de diseño [Autor].

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.

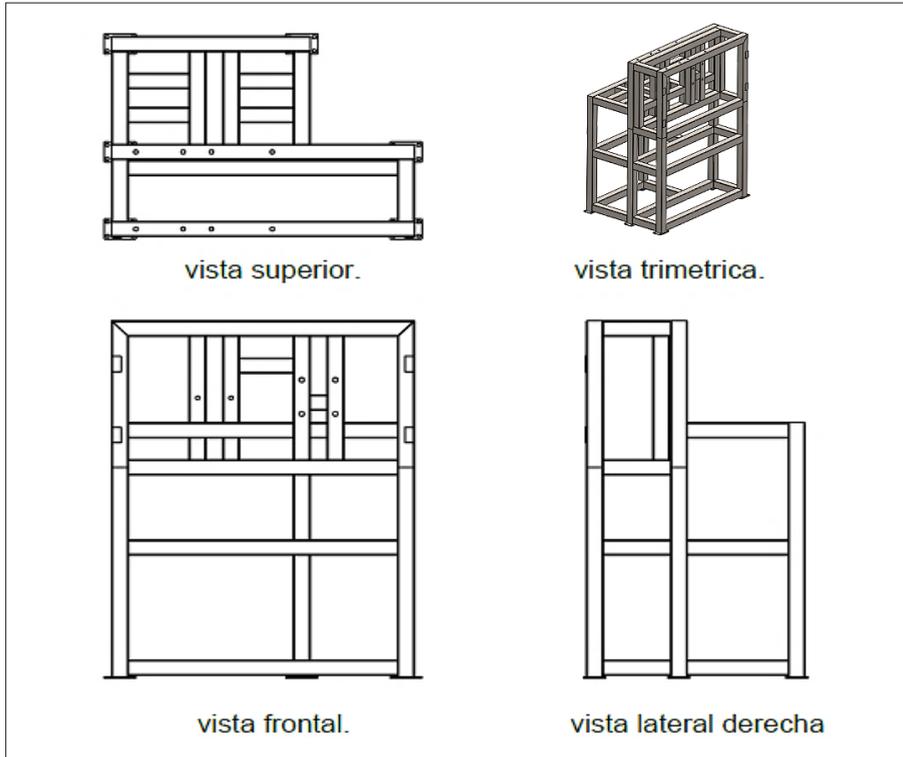


Figura 21. Vistas de la estructura diseñada.

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).

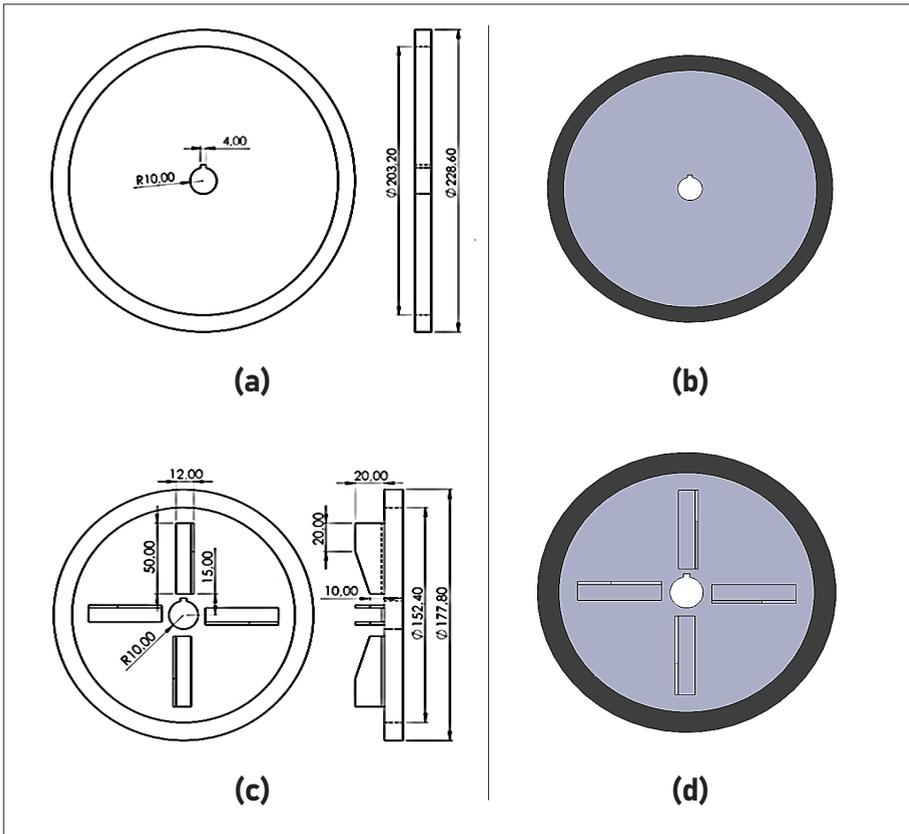


Figura 22. (a) Plano del disco ASTM G65 [20]; (b) Diseño del disco ASTM G65 [20]; (c) Plano de disco ASTM G105 [22]; (d) Diseño del disco ASTM G105 [22].

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° 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).

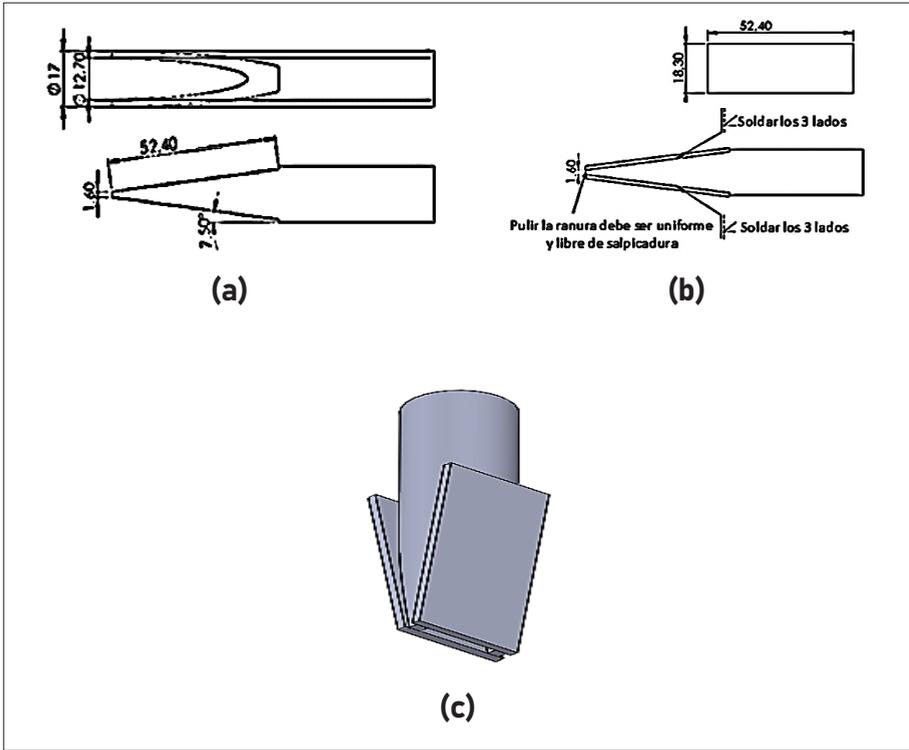


Figura 23. (a) Ítem 1: diámetro y forma cónica de la tubería [21]; (b) Ítem 2: platina y boquilla soldada [21]; (c) Representación de la boquilla de arena.

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 μm	Ninguna
50	300 μm	5 máximo
70	212 μm	95 mínimo
100	150 μm	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.

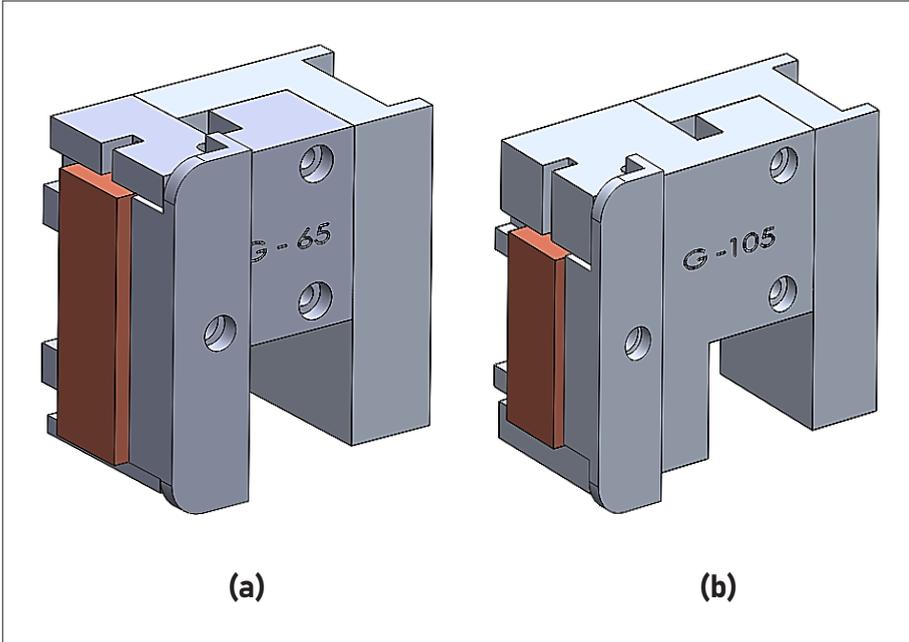


Figura 24. (a) Porta probeta G65; (b) Porta probeta G105.

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].

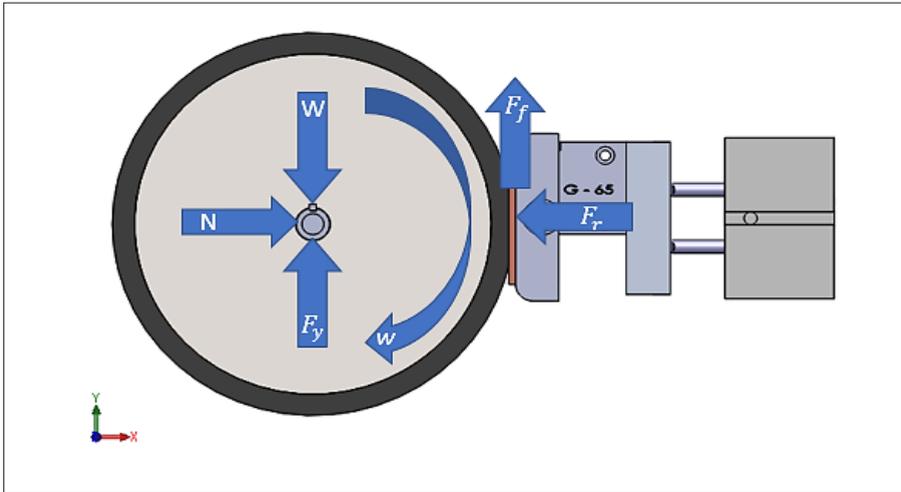


Figura 25. Esquema de fuerzas.

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: ($F \cong F_f \cong 177.6 N$), 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: ($\phi = 177.80 mm$), por lo que su radio resulta en ($r = 88.9 mm$) y w es la velocidad angular máxima que es de: ($w = 245rpm$). Aunque primero se hacen los cambios de unidades del radio en metros.

$$r = 88.9 mm$$

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

$$r = 0.0889 m$$

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

$$w = 245 rpm$$

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

$$w = 25.64 rad/s$$

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

$$P = 177.6 N * 0.0889 m * 25.64 rad/s$$

$$P \cong 404.82 W$$

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

$$P \cong 0.54 HP$$

Por lo tanto, se obtuvo una potencia ($P = 404.82 \text{ W}$) y según la norma ASTM G105, la potencia recomendada es de 750 W . El valor obtenido es un valor referencial para compararlo con el que está establecido en la norma. El motor utilizado es de 1 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 ρ_{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° y en la vista lateral tiene ángulos de 51°. 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.

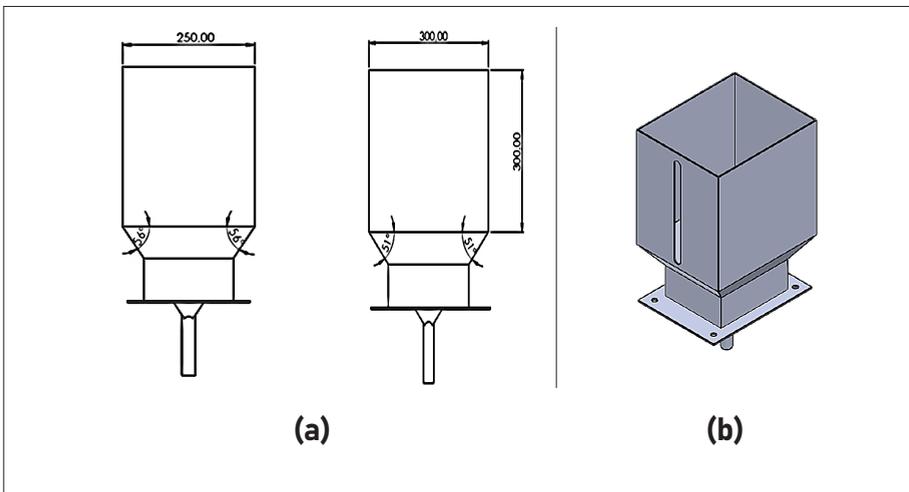


Figura 26. (a) Dimensiones de la tolva; (b) Diseño final de la tolva de arena.

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.

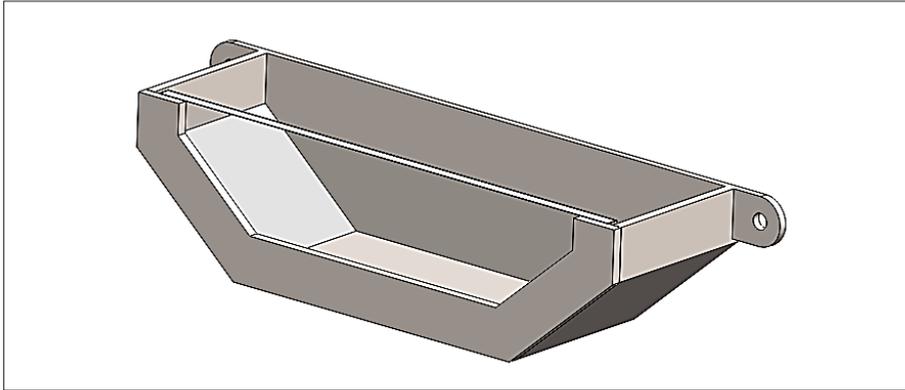


Figura 27. Contenedor de la mezcla de la norma ASTM G105.

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° y en la vista lateral tiene ángulos de 45° (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.

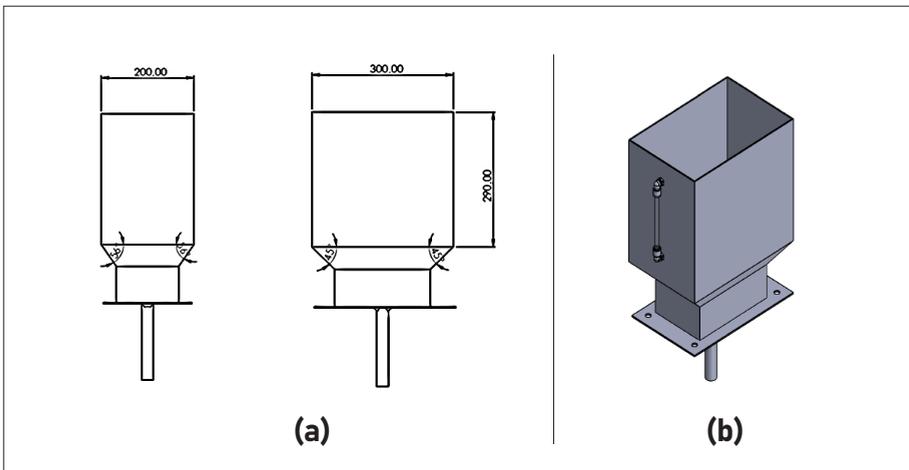


Figura 28. (a) Dimensiones de la tolva; (b) Diseño final tolva de agua.

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).

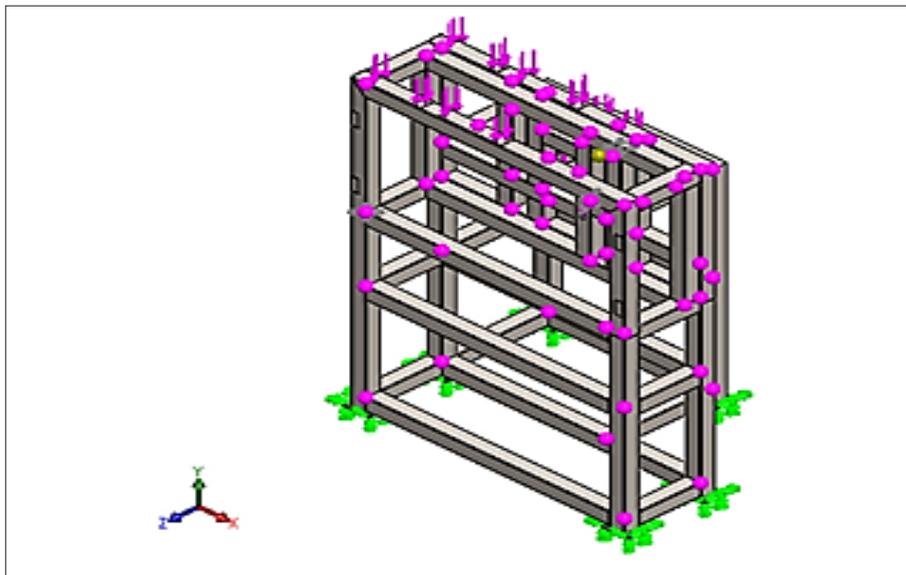


Figura 29. Simulación de la estructura.

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.

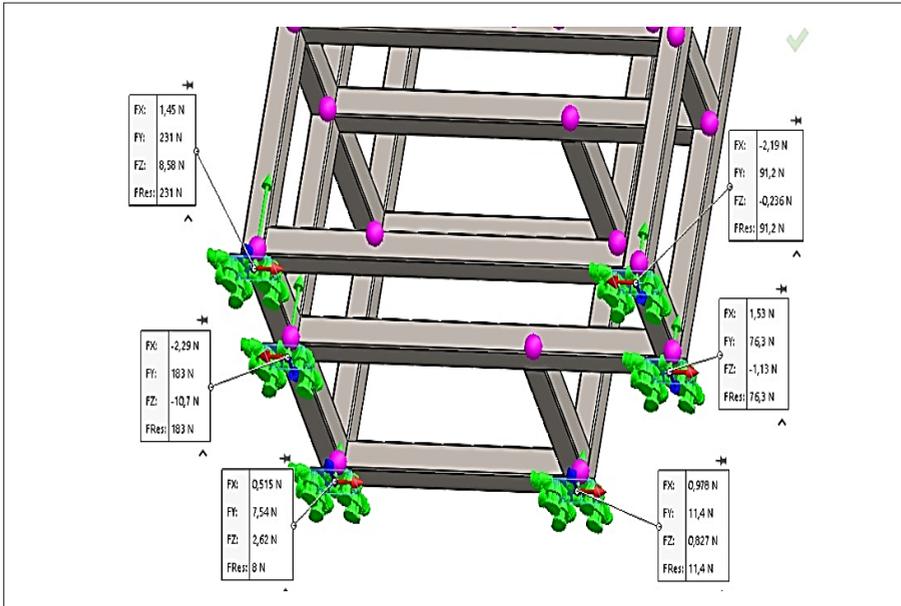
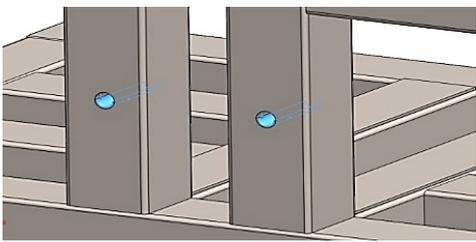


Figura 30. Fuerzas resultantes.

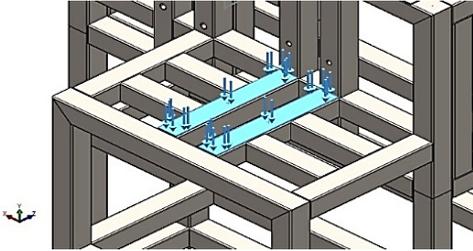
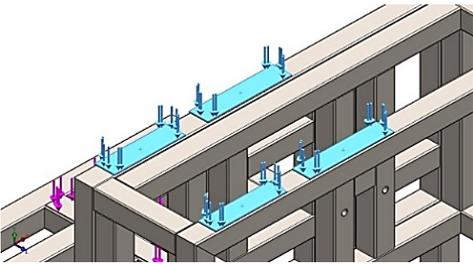
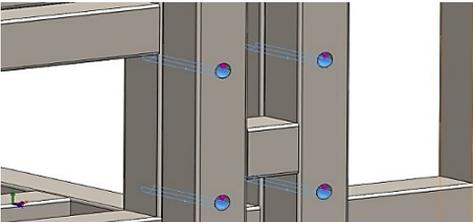
Para realizar la simulación, se trató de ser lo más realista posible y tratar de introducir todas las fuerzas externas que puedan presentarse como se aprecia en la Tabla 11. Al ejecutar la simulación con los datos de entrada expuestos anteriormente, se obtienen los siguientes valores de salida:

- **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).

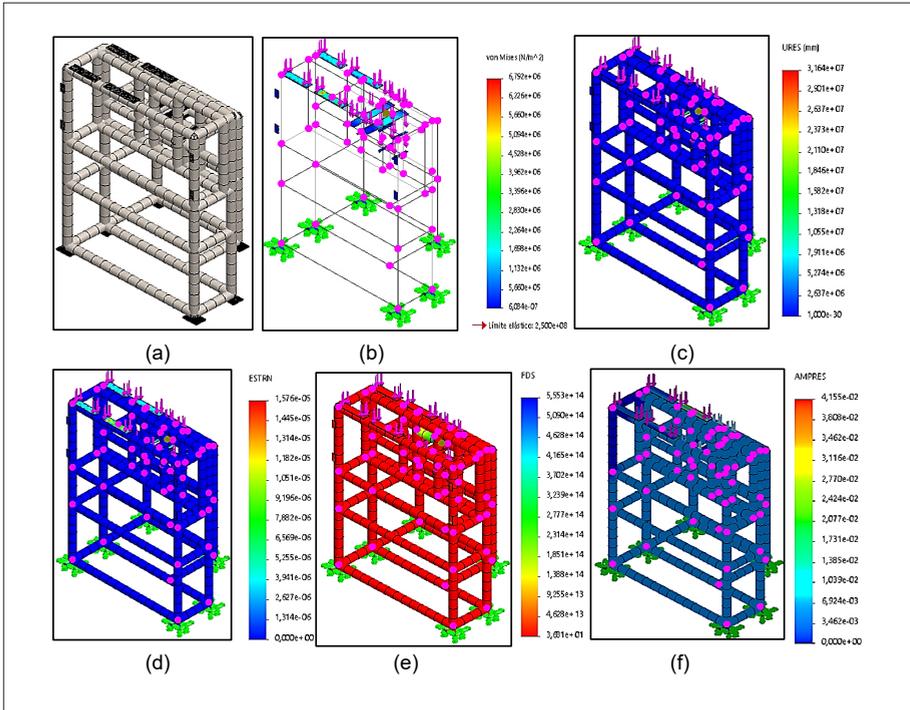


Figura 31. (a) Simulación del Mallado de la estructura; (b) Fuerzas resultantes en la estructura; (c) Desplazamientos resultantes en la estructura; (d) Deformación unitaria equivalente en la estructura; (e) Factor de seguridad en la estructura; (f) Estudio de pandeo en la estructura.

3.3.2. Simulación del eje

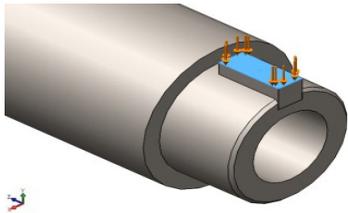
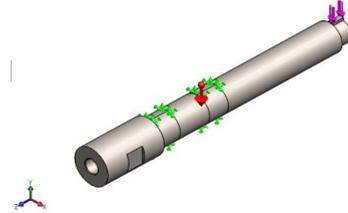
Según la información del equipo anterior, el material del eje es de AISI 4130 (Tabla 12), con base a sus propiedades, se suministraron los datos de entrada y salida para realizar la simulación correspondiente (Tabla 13).

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 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 cuento 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

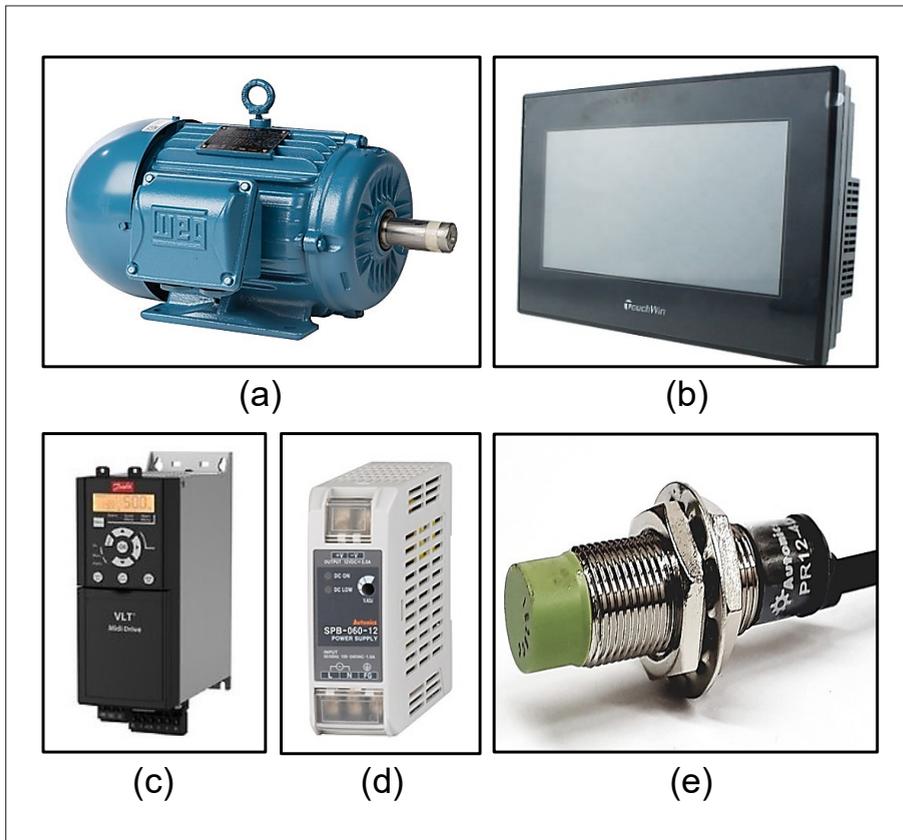


Figura 32. Elementos del circuito eléctrico; (a) Motor trifásico [29]; (b) Pantalla HMI integrada con PLC [30]; (c) Variador de velocidad [31]; (d) Fuente de voltaje [32]; (e) Sensor de proximidad [33].



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).

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

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

[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

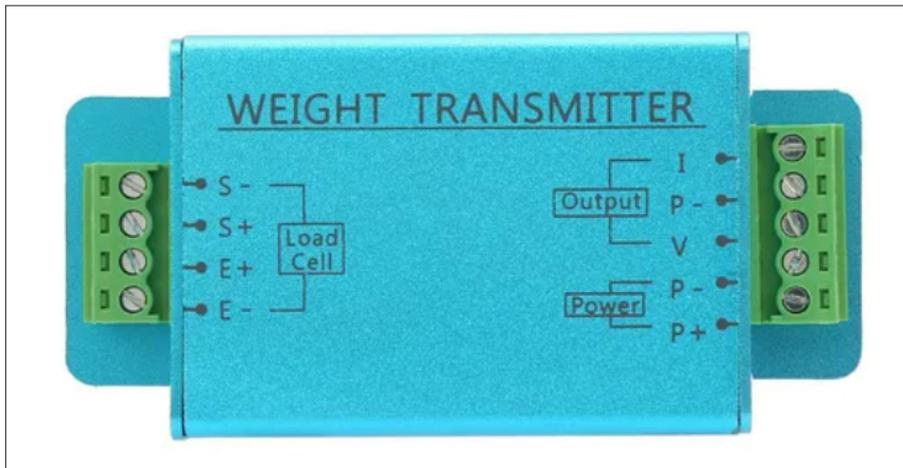


Figura 35. Transmisor de celda de carga [40].

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+

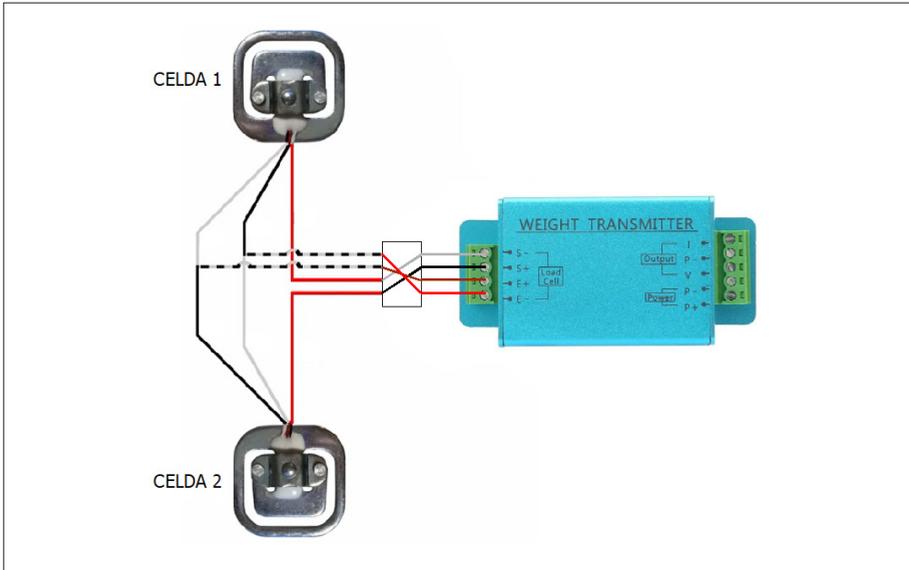


Figura 36. Conexión de las celdas de carga y el transmisor de peso.

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 análoga 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 análoga PLC) A10 a (transmisor de corriente) P2

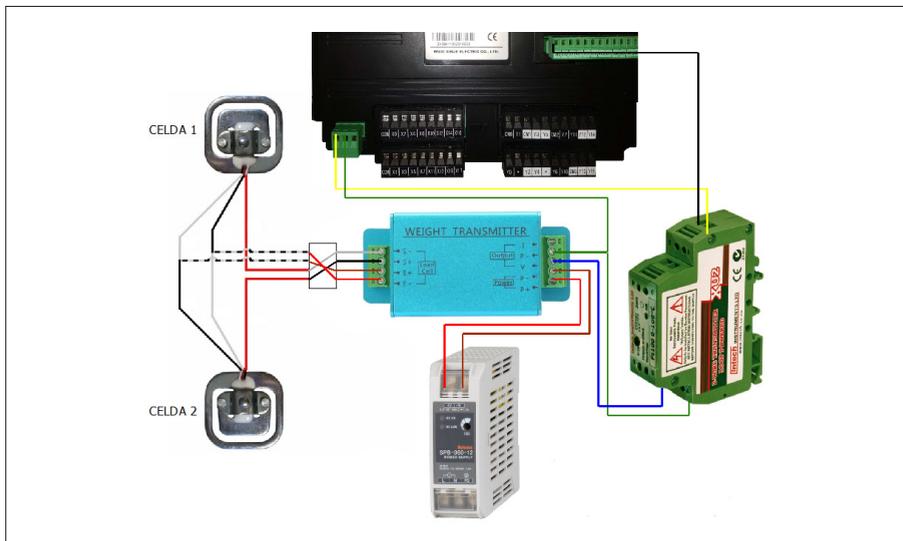


Figura 38. Conexión electrónica completa.



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).

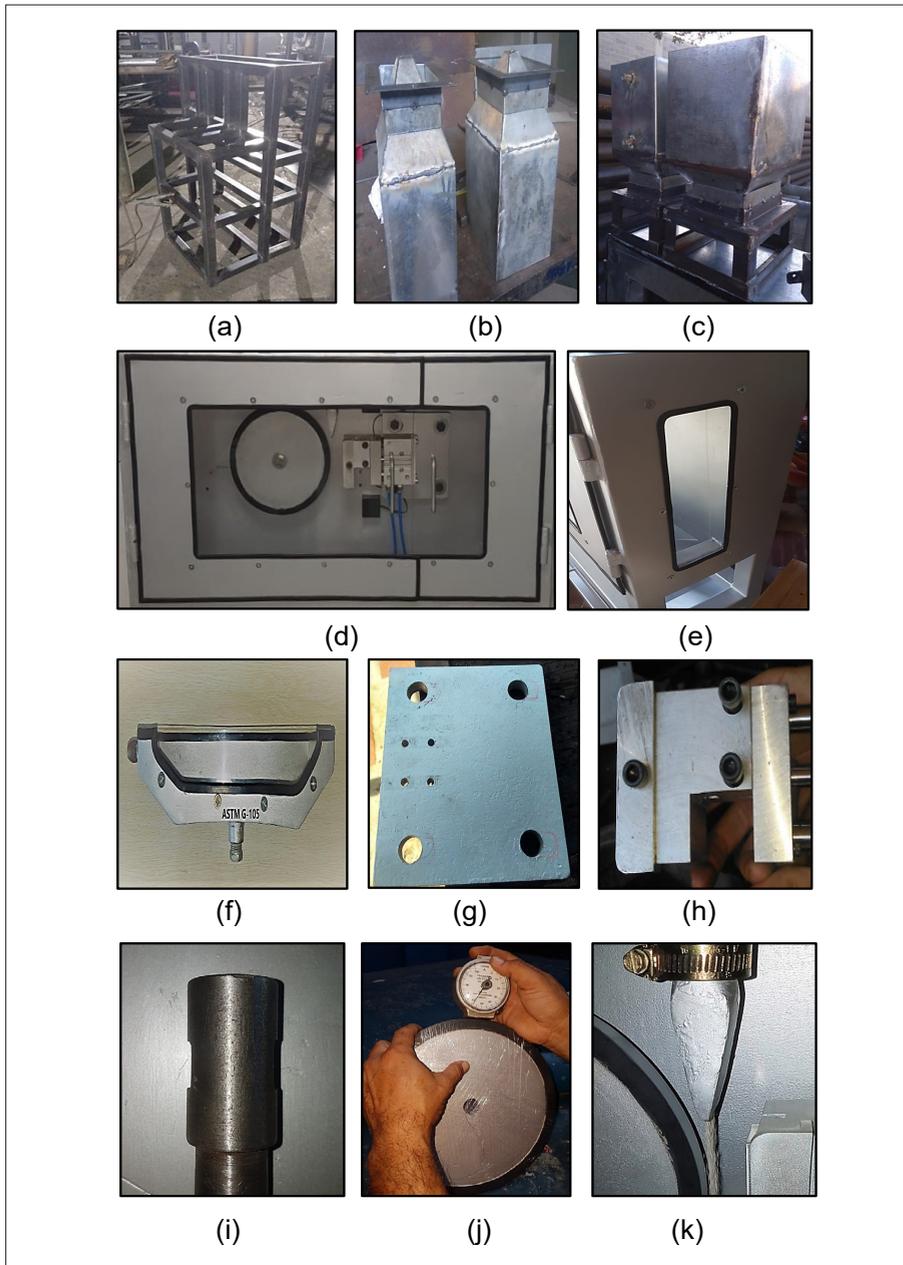


Figura 40. (a) Fabricación de la estructura metálica; (b) Fabricación de las tolvas; (c) Instalación de soportes en las tolvas; (d) Instalación de puertas; (e) Ventanas; (f) Contenedor de mezcla; (g) Placa de apoyo para el cilindro neumático; (h) Porta probetas; (i) Eje conector; (j) Medición de dureza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

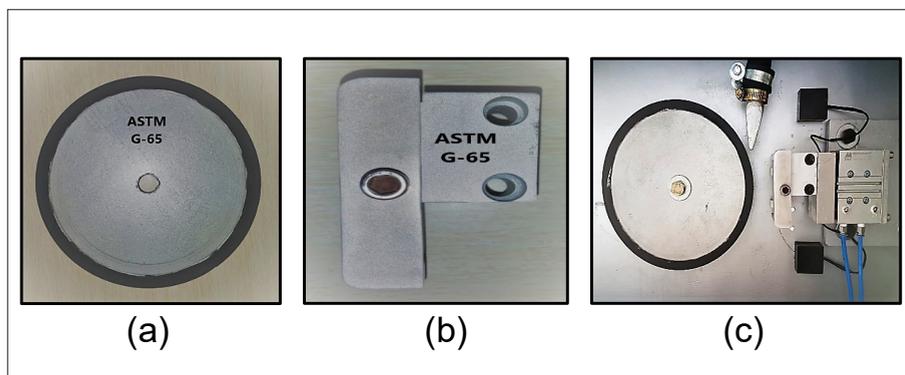


Figura 46. (a) Rueda de caucho de 228.6mm; (b) Porta probetas para ASTM G65; (c) Montaje completo de los elementos.

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

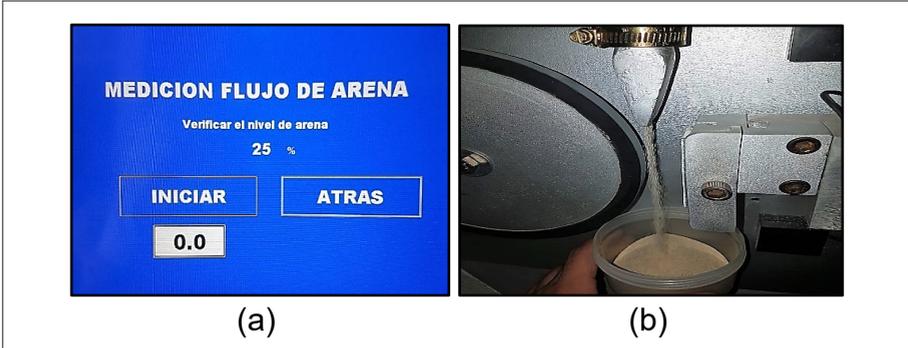


Figura 48. (a) Pantalla de flujo de arena; (b) Recolección del abrasivo.

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

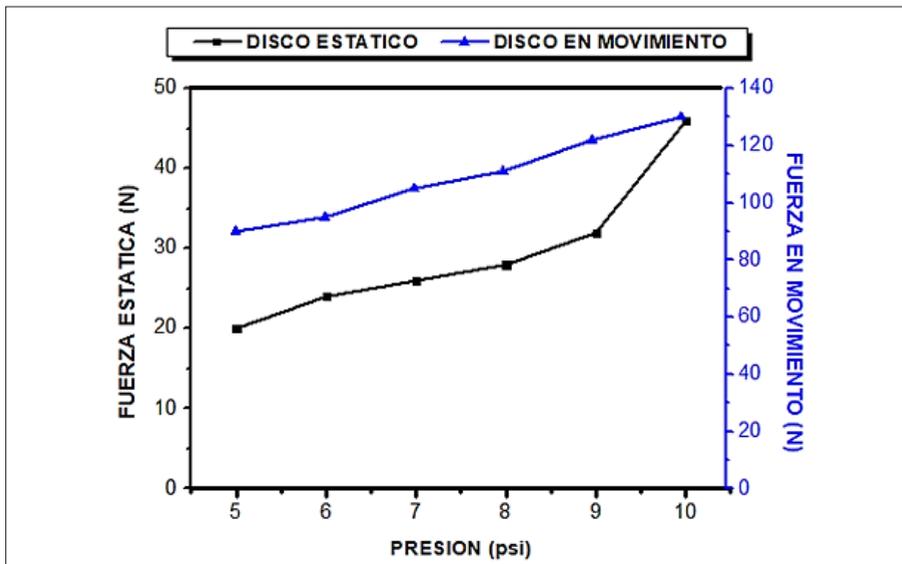


Figura 50. Punto de calibración de la fuerza de 130 N.

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).

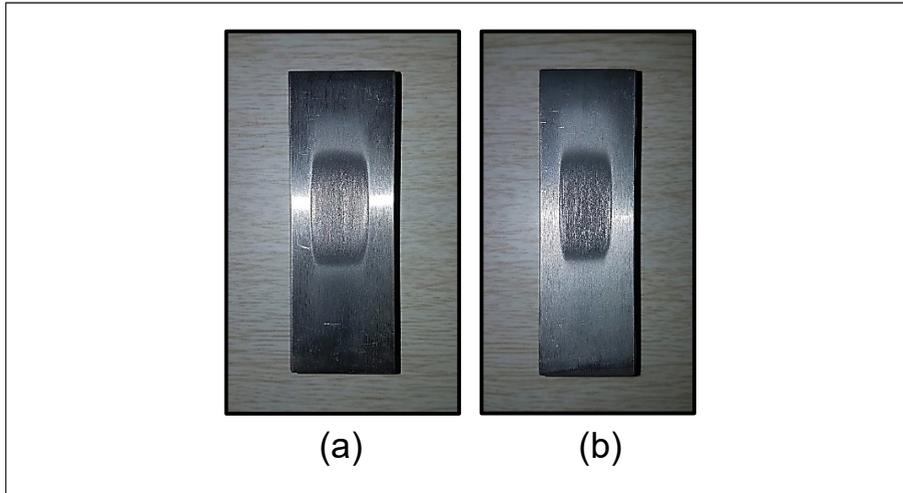


Figura 53. (a) Acero inoxidable martensítico ASIS 403; (b) Aluminio.

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).

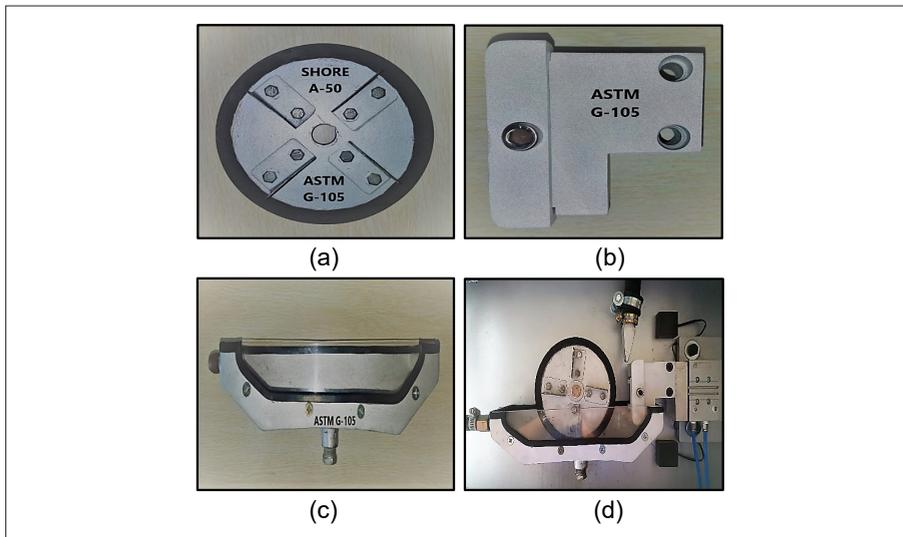


Figura 54. (a) Disco de caucho de 177.8 mm; (b) Portaprobetas ASTM G105; (c) Contenedor de mezcla; (d) Montaje completo.



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.

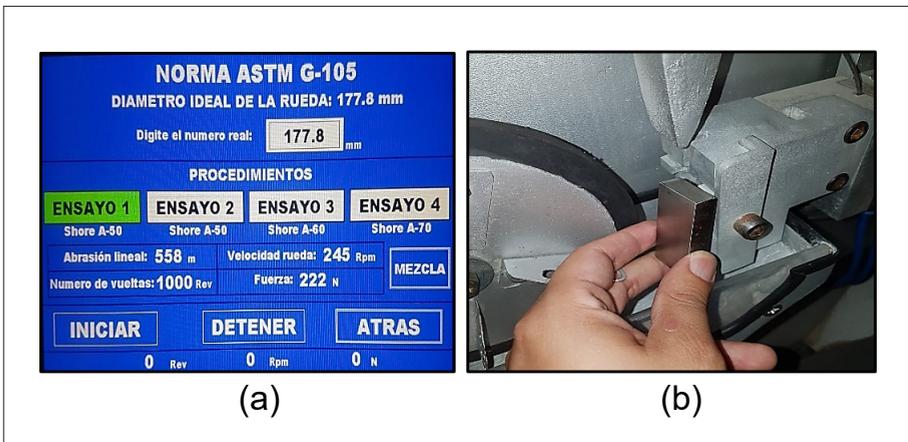


Figura 55. (a) Puesta de la probeta; (b) Elección del ensayo 1.

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.

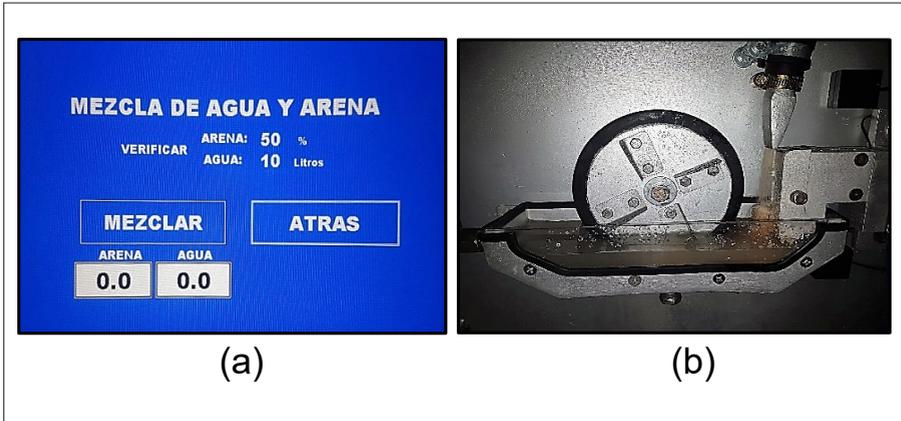


Figura 56. (a) Pantalla de mezcla; (b) Mezcla en el contenedor.

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

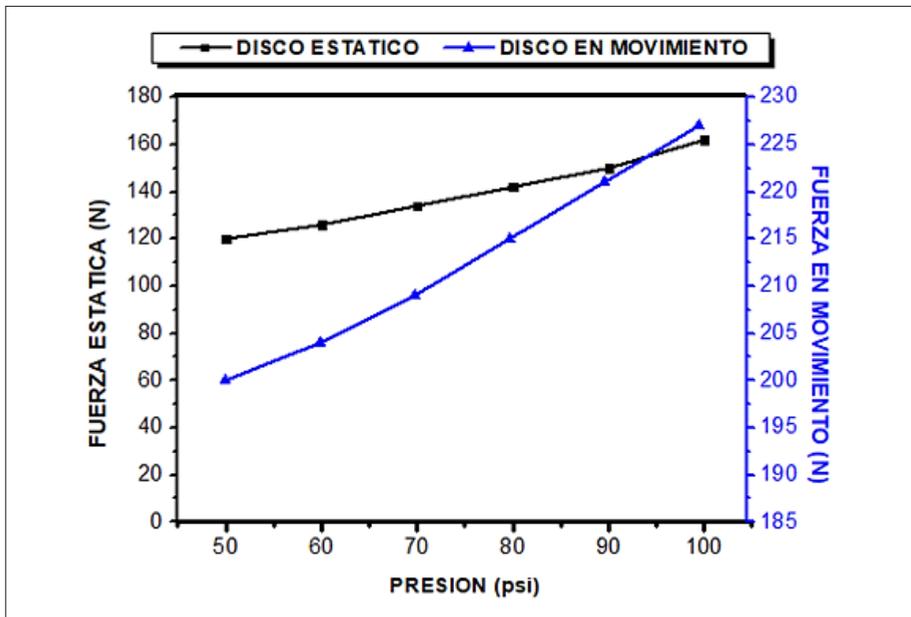


Figura 58. Punto de calibración de la fuerza de 222 N.

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).

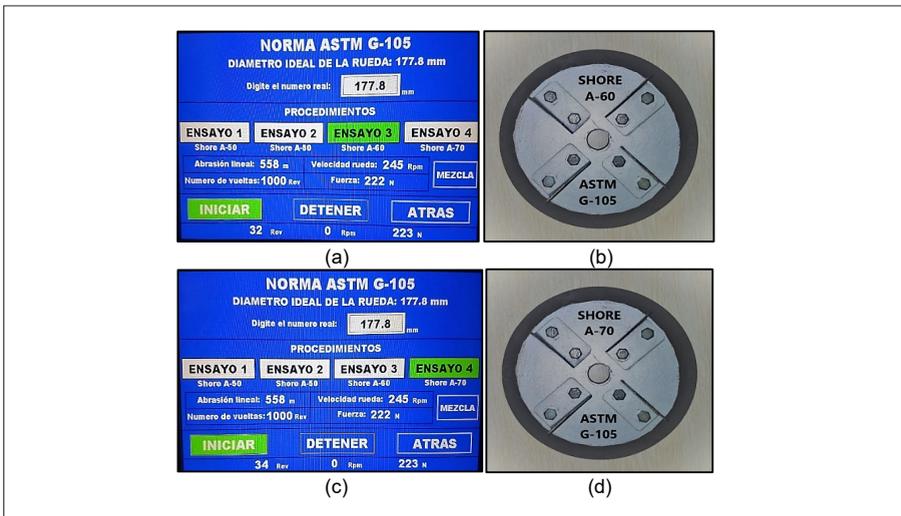


Figura 60. (a) Pantalla del ensayo 3 en ejecución; (b) Disco shore A60; (c) Pantalla del ensayo 4 en ejecución; (d) Disco shore A70.



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.

