

**DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA MÁQUINA PARA ENSAYO DE DESGASTE
ABRASIVO SEGÚN LINEAMIENTOS DE LA NORMA ASTM G-65**

SEBASTIÁN URIBE G

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
DIVISION DE INGENIERIAS
BOGOTÁ D.C.
2018**

**DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA MÁQUINA PARA ENSAYO DE DESGASTE
ABRASIVO SEGÚN LINEAMIENTOS DE LA NORMA ASTM G-65**

SEBASTIAN F. URIBE G.

**Trabajo de Grado en la modalidad de Proyecto de Apoyo a Docencia para
optar al título de Ingeniero Mecánico**

Director:
Ricardo A. Forero R.
Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
DIVISION DE INGENIERIAS
BOGOTÁ D.C.
2018**

Dedicatoria

A mi esposa Jessica quien conocí en la Universidad y desde entonces me ha acompañado, apoyado y complementado todas las decisiones de mi vida, con quien formé un hermoso hogar y con quien tengo a mi hija Mariana que representa lo mejor de nosotros.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Cristóbal Uribe y Yolanda Granados quienes, con su esmerado esfuerzo, sacrificio y dedicación con su hogar, han estado presentes en todos los momentos de mi vida, brindándome su incondicional apoyo y respaldo. Para ellos mi eterno agradecimiento por impulsar y apoyar de principio a fin el desarrollo de mis actividades académicas, sencillamente infinitas gracias, este título es para ustedes.

A mis excompañeros de trabajo en INCA FRUEHAUF, Manuel Tautiva, Wilmer Carreño, Daniel López y Johan Morales quienes participaron activamente en la construcción y fabricación de mi proyecto de grado, muchachos muchas gracias.

A mi director de proyecto de grado el ingeniero Ricardo Forero, quien con paciencia y dedicación me orientó de manera acertada, amigable y profesional durante el desarrollo de mi trabajo de grado.

RESUMEN

El presente proyecto expone el desarrollo del diseño y la fabricación de un dispositivo para el ensayo de desgaste abrasivo en seco conforme con los lineamientos presentes en la norma internacional ASTM G65. Su principal objetivo es el de complementar los procesos de enseñanza, aprendizaje e investigación en la facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Santo Tomás de Aquino (USTA).

A través de la implementación de la metodología de diseño, se identifican las necesidades funcionales de la norma, las cuales se plasman en un diseño conceptual que en complemento con un QFD, permiten alcanzar la elaboración de un diseño de detalle sobre el cual se realizaron los cálculos pertinentes que permitieron la correcta selección componentes, resultando en la construcción y fabricación de un dispositivo de ensayo que cumple a cabalidad con los requerimientos de la norma ASTM G65, cuyo diseño permite su fácil operación por parte de la comunidad estudiantil de la facultad de Ingeniería Mecánica de la USTA y que además se encuentra complementado con su respectiva práctica de laboratorio.

Palabras clave: Norma ASTM G-65, desgaste abrasivo, tribología, QFD (*Quality Function Deployment*).

ABSTRACT

Design and construction for a dry sand/rubber wheel test machine according to ASTM 65 standard.

This project shows the design and development for a dry sand/rubber wheel test machine according to ASTM G65 standard. This machine would be able to support some learning and investigation process to mechanical engineering community in Universidad Santo Tomas.

Through the development from a design methodology, the functional needs of the standard were identified and used in a conceptual design, it were complemented by a QFD, allow to achieve the elaboration of a detailed design that allowed the correct selection of components, resulting in the construction and manufacture of a test device that meets the requirement of the ASTM G65 student community standard the USTA Mechanical Engineering faculty and is also complemented with their respective laboratory test.

TABLA DE CONTENIDO

	<i>Pág.</i>
RESUMEN	9
1 INTRODUCCIÓN	12
2 MARCO TEÓRICO Y DE REFERENCIA.....	16
2.1 TRIBOLOGÍA	16
3 NORMA ASTM G-65	35
4 DISEÑO CONCEPTUAL	38
4.1 REQUERIMIENTOS INTERNOS	38
4.2 REQUERIMIENTOS EXTERNOS.....	39
4.3 CONSOLIDACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS.....	39
4.4 REQUERIMIENTOS DE INGENIERÍA	40
4.5 BENCHMARKING	40
4.6 CONTRASTE DEL BENCHMARKING	43
5 DESARROLLO CENTRAL	45
5.1 ELEMENTOS CONDICIONADOS POR LA NORMA ASTM G65	45
5.2 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS.....	55
6 GENERALIDADES DEL DISPOSITIVO.....	68
6.1 DESCRIPCIÓN GENERAL	68
6.2 PARÁMETROS PARA LA CERTIFICACIÓN DEL DISPOSITIVO.....	68
6.3 CALIBRACIÓN INICIAL DEL DISPOSITIVO.....	69
CONCLUSIONES	81
RECOMENDACIONES.....	82
BIBLIOGRAFÍA.....	83
ANEXOS.....	86
ANEXO No. 1 PRÁCTICA DE LABORATORIO	87
ANEXO No. 2 MEMORIA DE CÁLCULOS.....	94
ANEXO No. 3 MANUAL DE OPERACIÓN	106
ANEXO No. 4 PLANOS DE INGENIERÍA.....	120

1 INTRODUCCIÓN

La Facultad de Ingeniería Mecánica de la USTA, ha venido realizando grandes esfuerzos durante los últimos años, implementando estrategias que promueven y fomentan la enseñanza y el aprendizaje de las diferentes disciplinas a partir de la experiencia y los casos problema. Como resultado, se promueve la incorporación de novedosas metodologías en la formación de los futuros ingenieros, como por ejemplo el caso de la desarrollada por parte del consorcio CDIO (Concebir, Diseñar, Implementar y Operar), la cual permite al estudiante abordar un problema de ingeniería desde las diferentes etapas del desarrollo de un producto, proceso y/o concepto.

En contraste con lo anterior, se genera la necesidad de desarrollar equipos y dispositivos que soporten el proceso de enseñanza-aprendizaje para las diferentes ramas de aplicación para la disciplina de la ingeniería, donde se complementa de manera práctica el concepto y el desarrollo teórico instruido en el aula, con la práctica de laboratorio. Un ejemplo de ello podría ser caso del diseño, donde temáticas como la tribología requieren algo de soporte práctico.

El diseño de la máquina se ve determinado en muchos de sus aspectos por la norma ASTM G65, que suministra información detallada sobre los principales componentes del dispositivo, normalizando significativamente el diseño general de la máquina.

Entre las recomendaciones más importantes se destaca la exclusividad de la arena de Ottawa como único material abrasivo viable para la realización de los ensayos, la sensibilidad de la máquina a desalinearse por el traslado inadecuado y demás consideraciones que se explican en la práctica de laboratorio y el manual de usuario adjuntos.

El desgaste abrasivo o desgaste por abrasión es un fenómeno presente en la mayoría de los procesos industriales. Es uno de los factores que requieren atención y estudio por parte de los ingenieros puesto que, al comprender el comportamiento del mismo, se pueden tomar las medidas necesarias para afrontar el problema y contemplar la magnitud de afectación para limitar las consecuencias de este fenómeno sobre las herramientas de trabajo y/o maquinaria comprometida frente a esta modalidad de desgaste [2].

La importancia del estudio del desgaste por abrasión dentro de un sistema, radica –principalmente- en la parametrización de las condiciones que promueven la aparición de este fenómeno, de tal manera que se puedan proponer las acciones correctivas necesarias para mitigar su impacto dentro del sistema.

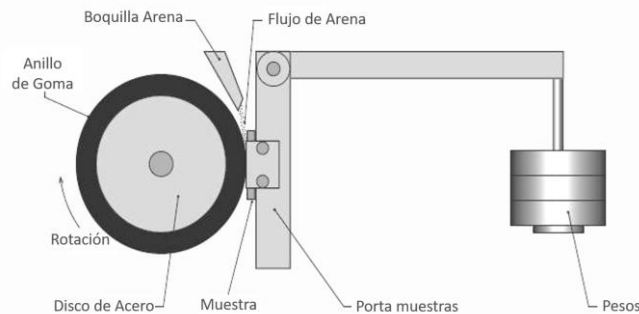
Existen máquinas para realizar el ensayo de desgaste abrasivo tanto en seco como en un húmedo. Estas máquinas han permitido el estudio del desgaste abrasivo a lo largo de los años en distintas condiciones por separado.

Actualmente, la norma ASTM especifica dos máquinas para ejecutar individualmente los ensayos de abrasión mencionados anteriormente:

- ASTM G-65: Método estándar de prueba para medir abrasión que usa el aparato de rueda de arena/caucho seco [1].
- ASTM G-105: Método estándar de prueba para conducir pruebas de abrasión de rueda de arena/caucho húmedo. [3]

Las máquinas tienen el mismo principio y la misma finalidad, pero con características diferentes. Para el caso de la máquina de abrasión para ensayos en seco, el principio básico es hacer incidir un flujo de arena contra una probeta que es sometida a contacto con una rueda mientras esta gira, mientras que en el caso de la máquina de abrasión para ensayo en húmedo el principio básico es generar un contacto entre el espécimen y la rueda cubierta de una goma sumergida hasta la mitad de la rueda de una mezcla de agua y arena [2].

Figura 1. Configuración Tribológica de la Máquina



Fuente: Manufactura de una Máquina para Ensayos de Abrasión en Seco [5]

El ensayo de desgaste por abrasión en seco contemplado por la norma ASTM G-65, exige que sólo algunas de las piezas fundamentales para la realización del ensayo se fabriquen en materiales y dimensiones específicas, establece los parámetros generales para la realización del ensayo de acuerdo con la modalidad de prueba que se vaya a realizar.

Debido a la estandarización de la prueba de desgaste abrasivo por parte de la ASTM y a la importancia de la información que se recopila a través de la realización de ensayos por abrasión, existen compañías que comercialmente ofrecen este tipo de máquinas ya construidas [3][4], otras compañías que brindan soporte para la construcción de dispositivos y máquinas de ensayos de desgaste

abrasivo [5][6], y hasta empresas de consultoría especializada que prestan el servicio de ensayo de desgaste abrasivo bajo norma ASTM G65 [7].

En Colombia, la perspectiva frente al tema del desgaste no es ampliamente estudiado por parte de la industria, realmente son las instituciones educativas quienes se encuentran al tanto de la importancia del estudio del desgaste abrasivo en los materiales y para ello, algunas facultades de ingeniería dentro del territorio nacional, han desarrollado sus propias máquinas de ensayo al desgaste abrasivo en seco cumpliendo con los lineamientos establecidos por la norma ASTM G65.

Entre las Universidades que cuentan con dispositivos o máquinas especializadas para el ensayo de desgaste abrasivo podemos encontrar la Universidad Distrital Francisco José de Caldas [8], la Universidad Tecnológica de Pereira [9] o la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín [10].

Así, la problemática planteada a través del presente proyecto, es cómo desarrollar un equipo que apoye el proceso de enseñanza-aprendizaje para una temática del espacio académico “Diseño I”, donde se pueda estudiar con mayor detalle parte de la tribología y en especial el desgaste abrasivo.

Por lo anterior, el objetivo general a alcanzar es:

“Diseñar y construir una máquina para ensayos de desgaste por abrasión en seco para los laboratorios de Ingeniería Mecánica de la USTA, siguiendo los lineamientos establecidos por la norma ASTM G-65”.

Por lo cual, se plantearon como objetivos específicos, los siguientes:

- Realizar el diseño conceptual, plantear un diseño preliminar y concluir un diseño en detalle de la máquina para ensayos de desgaste abrasivo.
- Fabricar y ensamblar los componentes para la máquina para ensayos de desgaste abrasivo en seco.
- Reproducir las condiciones de operación que expresa la norma para realizar el ensayo de desgaste.
- Realizar la verificación de los resultados obtenidos durante los ensayos con la máquina de desgaste, para cumplir con las exigencias de la norma ASTM G-65.
- Realizar un manual de usuario que describa el procedimiento de operación de la máquina de ensayos de desgaste abrasivo.
- Elaborar una práctica de laboratorio que incluya el uso de la máquina para ensayos de desgaste abrasivo en seco, para su desarrollo.

Se realizó un benchmarking, con el cual se evaluaron diferentes equipos existentes en el mercado frente a los requerimientos de la norma.

Al concebir el proyecto como un equipo de apoyo académico y el cual será operado por la comunidad estudiantil, se desarrolló su respectivo manual de usuario y una guía de laboratorio práctica.

En cuanto al presente documento se desarrollaron los diferentes capítulos de manera de evidenciar el proceso de diseño, fabricación y puesta a punto del equipo, de la siguiente manera:

A lo largo del marco teórico se abordan las temáticas generales que comprenden los fundamentos teóricos que soportan el desarrollo del presente dispositivo.

En el desarrollo del diseño conceptual se presentan los requerimientos del usuario final del dispositivo y se presentan algunos de los dispositivos que se encuentran en el mercado que cumplen con la misma funcionalidad del dispositivo desarrollado en el presente proyecto. Durante el desarrollo del diseño en detalle se expone la descripción detallada de los componentes que consolidan el dispositivo propuesto, seguido de los manuales de usuario y práctica de laboratorio propuestas para el uso del dispositivo dentro del plano académico.

2 MARCO TEÓRICO Y DE REFERENCIA

2.1 Tribología

La palabra Tribología se deriva del término griego “tribos”, el cual debe entenderse como “frotamiento o rozamiento”, así que la interpretación de la palabra puede ser, “la ciencia del rozamiento” [12]

Ordinariamente, se define como la ciencia y tecnología de los sistemas en movimiento relativo y en contacto mutuo. Comprende la fricción, desgaste, lubricación y otros aspectos relacionados con la ingeniería, física, química, fisiología, etc. Por tanto, es una ciencia interdisciplinar.

El principal objetivo de la Tribología es elevar la vida útil de las máquinas mediante la disminución de la fricción y el desgaste en sus componentes, lo anterior para combatir al máximo las interrupciones de operación por motivos como el sobrecalentamiento, averías y demás fenómenos relacionados con la desatención de la lubricación y el desgaste, además de la optimización de la transferencia de energía en los componentes mecánicos.

Pese a que el término tribología se utiliza desde mediados del Siglo XX, el interés por lo que comprende la tribología trasciende incluso a la misma historia, puesto que se ha descubierto que las herramientas de perforación que se utilizaron en el período Paleolítico fueron fijadas con una especie de bujes fabricados con cornamentas o huesos.

Documentos históricos registran el uso de la rueda cerca del 3500 a.C. evidencia del interés de nuestros antepasados en facilitar movimientos de traslación. Por otra parte, se sabe que los egipcios alcanzaron conocimientos frente a la fricción y la lubricación, ejemplo de ello se encuentra en sus carruajes donde utilizaron primitivos lubricantes a base de grasa animal para favorecer el rodamiento de sus ejes. [12]

El artista-científico renacentista Leonardo Da Vinci fue el primero que postuló un acercamiento a la fricción. Fue el quien dedujo las leyes que gobiernan el movimiento de un bloque rectangular que se desliza sobre una superficie plana, también fue el primero en proponer el concepto de coeficiente de fricción. Desafortunadamente sus escritos sólo fueron publicados cientos de años después de sus descubrimientos.

Sólo hasta 1699 es que el físico francés Guillaume Amontons redescubrió las leyes de la fricción formalmente al estudiar el deslizamiento entre superficies planas, sin embargo, hubo muchísimos estudios y descubrimientos referentes al tema a lo largo de la historia, puesto que científicos como Charles Agustín Coulomb, Robert Hooke, Isaac Newton, entre otros, aportaron conocimientos y descubrimientos importantes para el desarrollo de esta ciencia.

Durante el surgimiento de la Revolución Industrial el desarrollo tecnológico de maquinaria fomentó la aparición de nuevas técnicas de manufactura que requerían e impulsaban el estudio y desarrollo de nuevos lubricantes. Para inicios del siglo XX el enorme crecimiento industrial impulsado por las guerras mundiales y los motores de combustión interna, aportaron a la rápida evolución de todas las áreas que comprende la tribología.

La tribología se encuentra presente en prácticamente todos los aspectos de la industria moderna, sin embargo, algunos de los componentes de la tribología más populares son: rodamientos, sellos, frenos, embragues, pistones, engranes, levas, entre otros. Las aplicaciones ordinarias que contemplan el estudio de la tribología para sus operaciones abarcan motores eléctricos, motores de combustión, turbinas, procesos de corte, fundiciones y maquinaria en general. [12]

En resumen, la aplicación de conocimientos de la Tribología deriva en:

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

De acuerdo a algunos estimados, las pérdidas resultantes de la ignorancia en tribología en los Estados Unidos representan aproximadamente el 6% del total del producto bruto (\$200 billones de dólares por año en 1966), y aproximadamente un tercio de los recursos energéticos existentes se pierden en forma de fricción. Por esto, la importancia de la reducción de la fricción y el desgaste para un ahorro de dinero y una confiabilidad a largo plazo de la maquinaria. Según Jost (1966,1976), el Reino Unido podría ahorrar aproximadamente 500 millones de libras al año, y los Estados Unidos llegarían a ahorrar hasta 16 billones de dólares al año utilizando mejores prácticas tribológicas. Este ahorro es significativo y puede obtenerse sin hacer una gran inversión de capital. [12]

El estudio de la Tribología se basa en tres fenómenos fundamentales: la fricción entre dos cuerpos en movimiento, el desgaste como efecto natural de este fenómeno y la lubricación como un medio para mitigar el desgaste.

Fricción

Se define como la fuerza de rozamiento o fuerza de fricción entre dos superficies en contacto a la fuerza que se opone al movimiento de una superficie sobre otra (fuerza de fricción cinética) o a la fuerza que se opone al inicio del movimiento (fuerza de fricción estática). Toda fuerza de fricción se opone a la dirección del movimiento relativo entre superficies.

Existen dos tipos principales de rozamiento o fricción, la fricción estática y la fricción dinámica o cinética:

2.1.1.1 Fuerza de rozamiento estática

Es la fuerza entre dos objetos que no se encuentran en movimiento relativo entre ellos.

Como se observa en la figura 2, la fuerza F aplicada sobre el bloque de peso $W=mg$ aumenta gradualmente, pero el bloque permanece en reposo. Como la aceleración es cero, la fuerza aplicada es igual y opuesta a la fuerza de rozamiento estático F_e

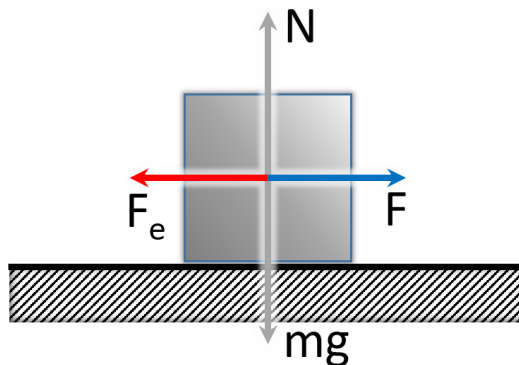
$$F = F_e \quad (1)$$

Donde,

F = Fuerza [N]

F_e = Fuerza de Fricción [N]

Figura 2 Creación de la fuerza de fricción F_e



Fuente: TRIBOLOGÍA: FRICCIÓN, DESGASTE Y LUBRICACIÓN. CAUTITLAN IZCALLI, 2007. [11]

La máxima fuerza de rozamiento corresponde al instante en el que el bloque está a punto de deslizar, esto es:

$$F_{e\ max} = \mu_e N \quad (2)$$

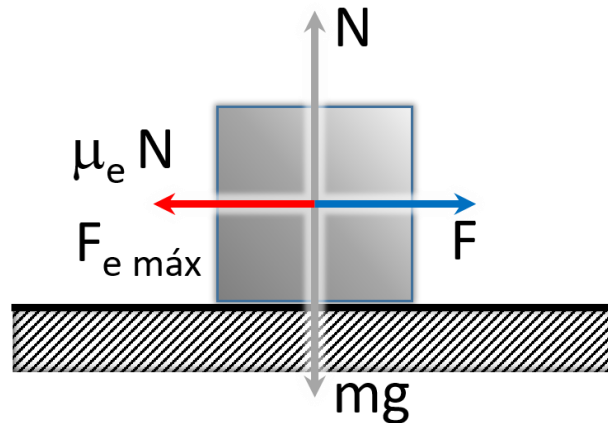
Donde,

$F_{e\ max}$ = Fuerza de Fricción Máxima [N]

μ_e = Coeficiente de Fricción

N = Fuerza Normal [N]

Figura 3 Fuerza de fricción máxima



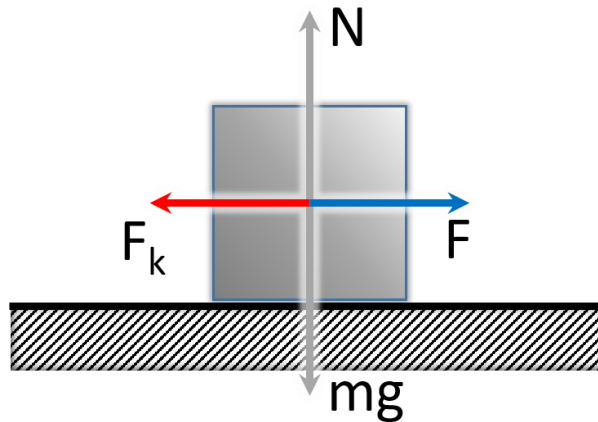
Fuente: TRIBOLOGÍA: FRICCIÓN, DESGASTE Y LUBRICACIÓN. CAUTITLAN IZCALLI, 2007. [11]

La constante de proporcionalidad μ_e se denomina coeficiente de fricción estático.

2.1.1.2 Fuerza de rozamiento cinética

En la figura 4, se muestra un bloque arrastrado por una fuerza F horizontal. Sobre el bloque actúan el peso mg , la fuerza normal N que es igual al peso, y la fuerza de rozamiento F_k entre el bloque y el plano sobre el cual se desliza. Si el bloque se desliza con velocidad constante la fuerza aplicada F será igual a la fuerza de rozamiento F_k .

Figura 4 Fuerza de rozamiento cinética F_k



Fuente: TRIBOLOGÍA: FRICCIÓN, DESGASTE Y LUBRICACIÓN. CAUTITLAN IZCALLI, 2007. [11]

Se puede investigar la dependencia de F_k con la fuerza normal N . Se ve que si se duplica la masa m , del bloque que desliza colocando encima de éste otro igual, la fuerza normal se duplica, la fuerza F con la que se tira del bloque se duplica y por tanto F_k se duplica.

De ese modo, la fuerza de rozamiento dinámico F_k es proporcional a la fuerza normal N .

$$F_k = \mu_k N \quad (3)$$

Donde,

F_k = Fuerza de Fricción Cinemática [N]

μ_k = Coeficiente de Fricción Dinámico]

N = Fuerza Normal [N]

La constante de proporcionalidad μ_k es un número sin dimensiones que se denomina coeficiente de rozamiento cinético.

2.1.1.3 Valores de los coeficientes de fricción

Los coeficientes de rozamiento estático y dinámico dependen de las condiciones de preparación y de la naturaleza de las dos superficies y son casi independientes del área de la superficie de contacto. Veamos algunos ejemplos:

Si bien se tiene cierto conocimiento que diferencia el rozamiento estático del dinámico, se entiende también que el rozamiento estático es mayor que el dinámico, lo anterior puesto que, al permanecer dos superficies en reposo, pueden aparecer enlaces iónicos o incluso micro soldaduras entre las superficies. Este fenómeno tiende a incrementarse en cuanto más perfectas – o menos rugosas – son las superficies en contacto, como, por ejemplo: el contacto entre un pistón y la camisa de un cilindro al interior de un motor, que si permanecen por un prolongado período de tiempo en contacto y en absoluto reposo, tienden a soldarse entre sí.

Tabla 1 Coeficiente de rozamiento de algunos materiales

Materiales en Contacto	Fricción Estática	Fricción Cinética
Hielo//Hielo	0,1	0,03
Vidrio//Vidrio	0,9	0,4
Madera//Cuero	0,4	0,3
Madera//Piedra	0,7	0,3
Madera//Madera	0,4	0,3
Acero//Acero	0,74	0,57
Acero//Hielo	0,03	0,02
Acero//Latón	0,5	0,4
Acero//Teflón	0,04	0,04
Teflón//Teflón	0,04	0,04
Caucho//Cemento (seco)	1,0	0,8
Caucho//Cemento (húmedo)	0,3	0,25
Cobre//Hierro (fundido)	1,1	0,3
Esquí (encerado)//Nieve (0°C)	0,1	0,05
Articulaciones Humanas	0,01	0,003

Fuente: Tribología: fricción, desgaste y lubricación. Cautitlan izcalli, 2007. [11]

2.1.1.4 Rugosidad

Antes de proceder a determinar el significado del término rugoso, se hace imprescindible conocer el origen etimológico del mismo. Por lo anterior se determina que el proviene del latín, concretamente del adjetivo “rugosus” (“rugoso” o “áspero”), que se formó a partir de la suma de dos elementos: el sustantivo “ruga”, que traduce “aspereza” y el sufijo “-osus”, equivalente a “abundante en”, que en conjunto sugiere un significado relativo a abundancia de arrugas o asperezas.

En ingeniería, concebimos la rugosidad como la medida de las variaciones micrométricas en la superficie de los artículos manufacturados, que presentan cierto grado de asperezas de acuerdo con las características propias del proceso de manufactura.

La idea de una superficie perfecta es una abstracción matemática, debido a que todas las superficies presentan irregularidades, aunque visualmente no sean perceptibles.

Las irregularidades mayores son errores perceptibles o reconocibles mediante instrumentos ordinarios, la planitud, redondez, cilindridad entre otras. Por otra parte, las irregularidades menores son la ondulación y la rugosidad.

Las ondulaciones pueden ser producto de la flexión durante un maquinado, falta de homogeneidad en el material, tratamientos térmicos, entre otros, mientras que la rugosidad puede obtenerse mediante un mecanizado.

El acabado superficial de los cuerpos puede presentar errores de forma macrogeométricos y microgeométricos. La rugosidad superficial es el conjunto de irregularidades de la superficie real, definidas convencionalmente en una sección donde los errores de forma y las ondulaciones han sido eliminados. [12]

Tabla 2 Acabado superficial por proceso

Proceso	Acabado de la Superficie (mm)		
FUNDICIÓN EN ARENA	POBRE	12-25	N10-N12
LAMINADO EN FRIO	BUENO	1-3	N6-N8
EXTRUSIÓN EN FRIO	BUENO	1-4	N6-N9
TALADRADO	MEDIANO	1,5-6	N7-N9
FRESADO	BUENO	1-6	N7-N9
TORNEADO	BUENO	0,5-6	N6-N9
PULIDO	EXCELENTE	0,1-0,5	N3-N5

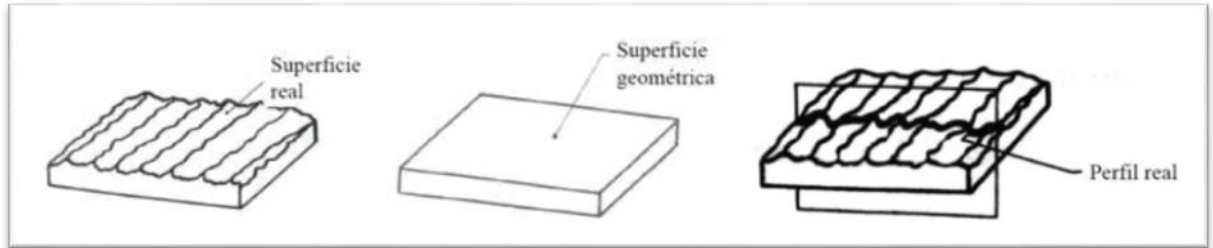
Fuente: Máquinas, Métodos y Control Dimensional del Procesamiento, 2000. [12]

Como una caracterización general de la superficie, se describen tres tipos principales de superficie:

- **Superficie real:** Superficie que limita el cuerpo y lo separa del medio que lo separa

- **Superficie geométrica:** Superficie ideal cuya superficie está especificada por el dibujo o documento técnico.
- **Superficie de referencia o perfil real:** Superficie a partir de la cual se determinan los parámetros de rugosidad. Tiene la forma de la superficie geométrica. Se puede calcular por el método de mínimos cuadrados, se observa como la intersección de la superficie real con un plano normal.

Figura 5 Caracterización de la superficie



Fuente: Máquinas, Métodos y Control Dimensional del Procesamiento, 2000. [12]

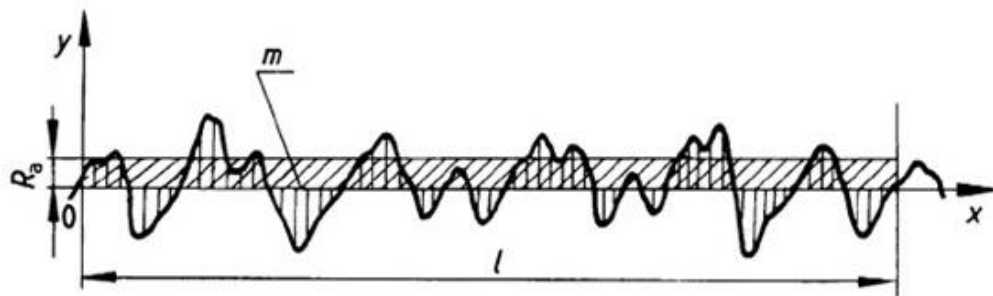
2.1.1.4.1 Parámetros de Rugosidad

Los parámetros o valores de rugosidad, se definen para poder medir la rugosidad de manera cuantitativa. Se pueden calcular a partir del perfil de rugosidad obtenido o a través de un rugosímetro. Los parámetros están definidos por las distintas normas. Las unidades que se utilizan para medirlos son la micra o la macropulgada.

2.1.1.4.2 Rugosidad Media (R_a)

Para calcular la R_a , se suman los valores absolutos de las áreas comprendidas entre el perfil de rugosidad y la línea media, y se dividen por la longitud de la medición (ver ecuación 4).

Figura 6 Rugosidad media (R_a)



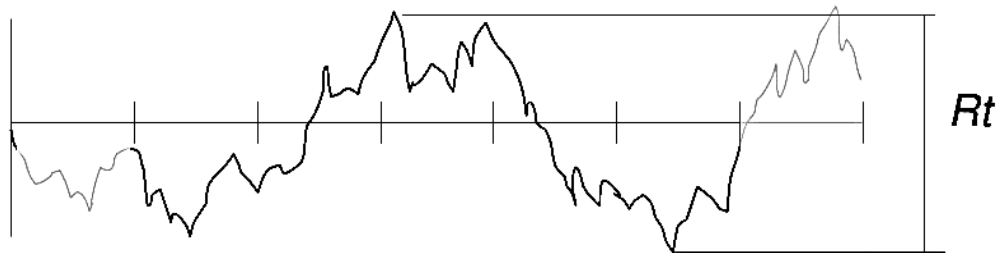
Fuente: Tribología: fricción, desgaste y lubricación. Cautitlan Izcalli, 2007. [11]

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (4)$$

2.1.1.4.3 Rugosidad Total o Rugosidad Máxima (Rt)

Es la distancia o longitud máxima entre el pico más alto y el valle más profundo en la medición longitudinal.

Figura 7 Rugosidad máxima (Rt)



Fuente: TRIBOLOGÍA: FRICCIÓN, DESGASTE Y LUBRICACIÓN. CAUTITLAN IZCALLI, 2007. [11]

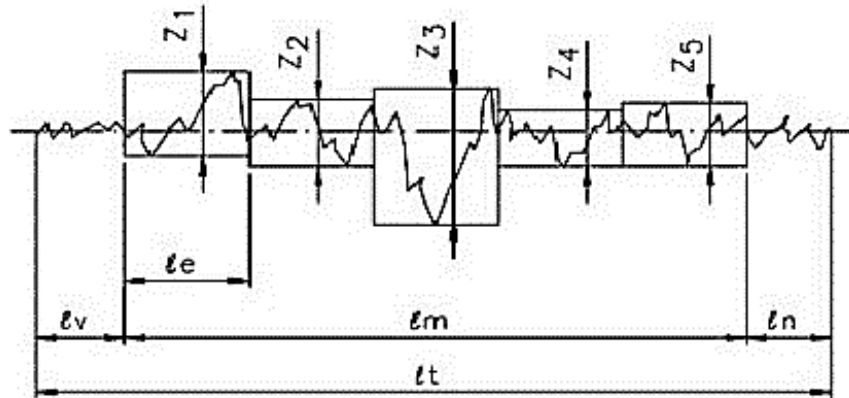
2.1.1.4.4 Rugosidad Media (Rz)

Es el promedio de la rugosidad máxima obtenida en cinco tramos de medición consecutiva pero no necesariamente equidistante.

$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5} \quad (5)$$

Donde Z_x es el valor de la rugosidad obtenido en cada uno de los tramos registrados.

Figura 8 Rugosidad media (R_z)



Fuente: Máquinas, Métodos y Control Dimensional del Procesamiento, 2000. [12]

2.1.1.4.5 Resumen aplicativo de los tres tipos de rugosidad.

Tabla 3. Características de los tres tipos de rugosidad

PARÁMETRO	Ra	Rt	Rz
Utilidad	- Cuando es necesario un control continuo de la superficie. - La superficie presenta surcos bien orientados. - Si el acabado superficial no tiene mayor importancia	- En superficies de sellado. - En superficies dinámicamente cargadas (tapones, tornillos y superficies de deslizamiento)	- Se utiliza en casos en que los valores extremos no influyen en la función de la pieza (superficies de apoyo)
Ventajas	- Es el parámetro más utilizado - Se aplica en la mayoría de los procesos de fabricación. - Todos los instrumentos de medición lo calculan.	- Informa la máxima deterioración de la superficie. - Es de fácil registro a partir del gráfico.	- Informa distribución media de la superficie. - Fácil registro a partir del gráfico. - Define bien las superficies periódicas.
Desventajas	- Sólo indica la media de rugosidad - Si aparecen valles o picos que no son típicos, el valor no varía considerablemente - No indica forma de	- No presenta información suficiente que diferentes formas de rugosidad pueden tener el mismo valor de Rt.	- Oculta los picos y valles muy acentuados. - No brinda información sobre la forma del perfil. - No todos los equipos presentan

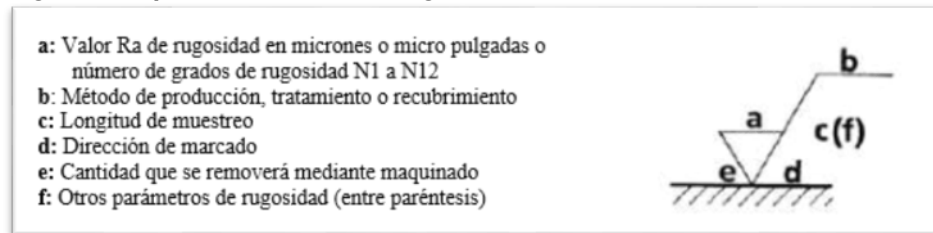
	irregularidades del perfil.		este parámetro.
--	-----------------------------	--	-----------------

Fuente: Medición de Rugosidades, Diego Seco. 2012 [13]

2.1.1.5 Representación de la rugosidad

De acuerdo con la norma ISO 1302-1978, las especificaciones del acabado superficial deberán colocarse en relación con el símbolo básico como se muestra a continuación:

Figura 9 Representación de la rugosidad



Fuente: Medición de Rugosidades, Diego Seco. 2012 [13]

3.1.2 Desgaste

El proceso de desgaste se puede definir como una pérdida de material o desprendimiento en el área de contacto entre dos cuerpos cuando se les induce a un movimiento relativo a través de una fuerza.

La clasificación del desgaste toma dos aspectos en consideración; el primero es basado en cómo ocurre el desgaste en las piezas o componentes; como pueden ser las picaduras, degradación, estriación entre otras. El segundo aspecto es mayormente utilizado y toma en consideración las bases del mecanismo o acción tribológica. [11]

Dentro de los principales mecanismos de desgaste se identifican seis clases:

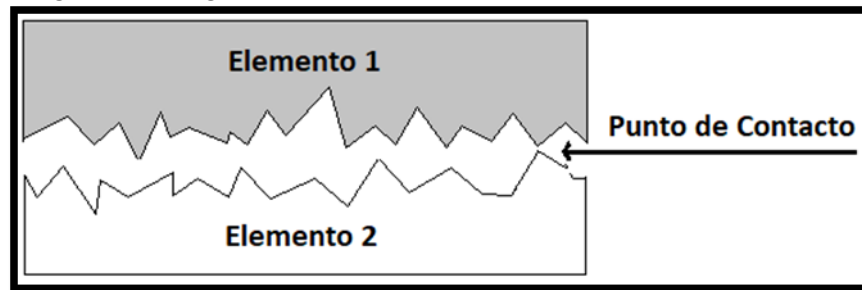
- Desgaste adhesivo.
- Desgaste por fatiga.
- Desgaste por erosión.
- Desgaste corrosivo
- Desgaste por abrasión.

2.1.1.6 Desgaste Adhesivo:

Esta forma de desgaste se presenta cuando dos superficies en contacto se deslizan una contra otra mientras se encuentran sometidas a presión. Se refiere al tipo de desgaste provocado por el deslizamiento de una superficie sólida sobre otra sin la participación de una partícula.

Si se observara a nivel microscópico, la aspereza presente entre los elementos en contacto donde ocurre el deslizamiento debido a los altos esfuerzos localizados en las crestas, llevan a que las fuerzas de deslizamiento fracturen la unión, desgarrando al material de una superficie y transfiriéndolo a otra, lo que puede ocasionar posteriormente mayor daño. [11]

Figura 10 Desgaste adhesivo entre dos elementos en movimiento

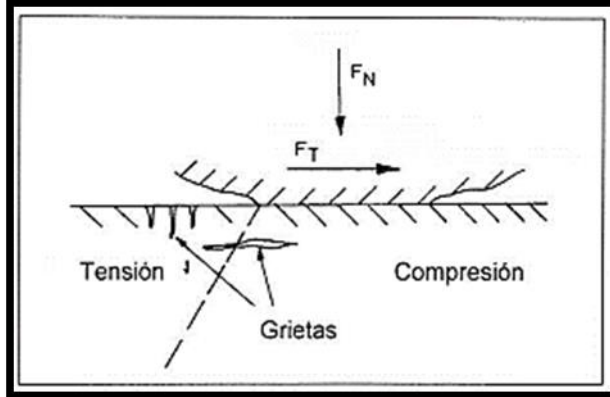


Fuente: TRIBOLOGÍA: FRICCIÓN, DESGASTE Y LUBRICACIÓN. CAUTITLAN IZCALLI, 2007. [11]

2.1.1.7 Desgaste por fatiga o fatiga superficial

El desgaste por mecanismo de fatiga es el resultado de esfuerzos cíclicos entras las asperezas de dos superficies en contacto. El coeficiente de fricción es el factor determinante puesto que al estar las superficies lubricadas el desgaste por adhesión es mínimo, sin embargo, en sistemas con coeficientes de fricción muy altos, se presentarán zonas de deformación intensa muy cerca de la superficie, generando grietas superficiales. [11]

Figura 11 Desgaste por fatiga



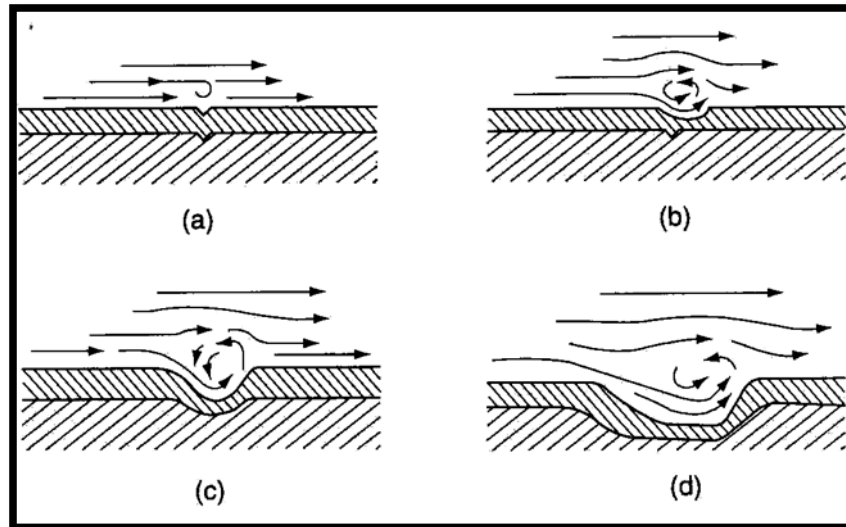
Fuente: TRIBOLOGÍA: FRICCIÓN, DESGASTE Y LUBRICACIÓN. CAUTITLAN IZCALLI, 2007. [11]

2.1.1.8 Desgaste por erosión

Se presenta cuando existe un desprendimiento de material a través del impacto repetitivo de partículas sólidas o líquidas (o ambas) sobre una superficie.

Por lo general el desgaste por erosión prospera en elementos expuestos a flujos de altas velocidades como turbinas o escapes de motores. Tiene un aspecto de hoyuelos y pequeñas marcas sobre la superficie.

Figura 12 Fases de un desgaste por erosión ordinaria



Fuente: TRIBOLOGÍA: FRICCIÓN, DESGASTE Y LUBRICACIÓN. CAUTITLAN IZCALLI, 2007. [11]

También es comúnmente utilizado en la industria como una operación deseable, como son los procesos de Sand-blasting, limpieza interna de tuberías, entre otras.

2.1.1.9 Desgaste por corrosión

Es el desgaste producto de la influencia del medio ambiente, por lo general la humedad o la incompatibilidad química. Se puede decir que es la primera etapa, puesto que generalmente viene seguido de abrasión, fatiga o erosión sobre la capa corrosiva originada.

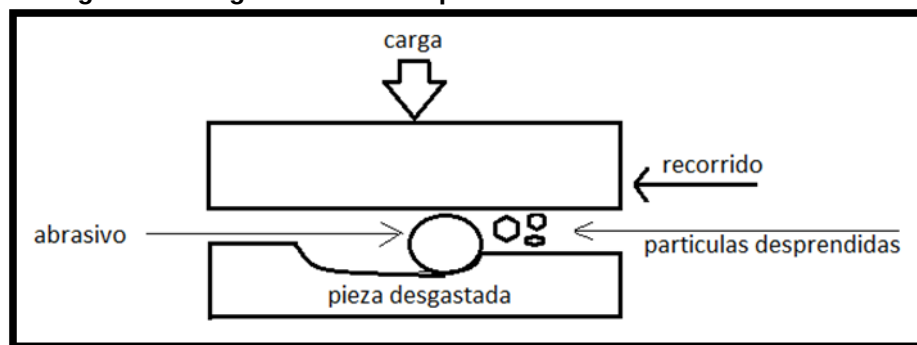
A este grupo también pertenece el desgaste por oxidación que se genera por la acción del oxígeno atmosférico disuelto en el lubricante, generando daño superficial. [11]

2.1.1.10 Desgaste por abrasión

Es el desgaste producto de la remoción de material de la superficie en contacto por partículas sólidas entre las superficies en coincidencia, o con superficies duras que presentan movimiento relativo entre sí.

Este tipo de desgaste también existe cuando hay presencia de lubricación, puesto que la contaminación del mismo se presta para la presencia de este tipo de desgaste.

Figura 13 Desgaste abrasivo típico



Fuente: Tribología: fricción, desgaste y lubricación. Cautitlan izcalli, 2007. [11]

Al entrar en contacto dos superficies ambas sufren desgaste, generándose mayor daño en alguna de ellas, la que sufrió un menor daño se le denomina superficie abrasiva. La magnitud del daño producido depende de la cantidad de partículas abrasivas en ambas superficies, la velocidad de contacto, condiciones ambientales, temperatura y fuerza ejercida en ambas superficies.

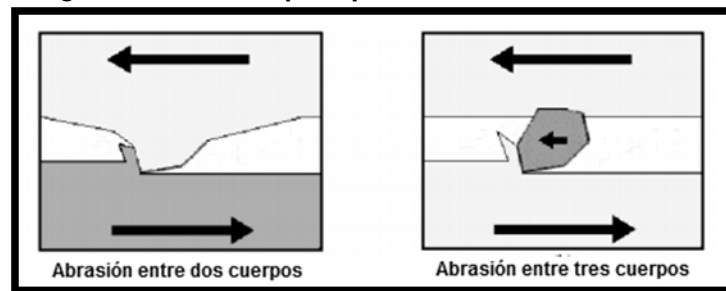
El desgaste por abrasión se puede clasificar en dos categorías: de acuerdo al tipo de contacto y al nivel de daño sufrido.

2.1.1.10.1 Abrasión por tipo de contacto

Se puede presentar como abrasión entre dos o tres cuerpos tal y como se identifica a continuación:

- Abrasión de dos cuerpos: Ocurre cuando una superficie irregular de un material es presionada contra otra con menor dureza.
- Abrasión de tres cuerpos: Se presenta cuando existen partículas con una dureza superior atrapadas en medio de dos superficies. La fuerza aplicada se transmite a través de las partículas abrasivas.

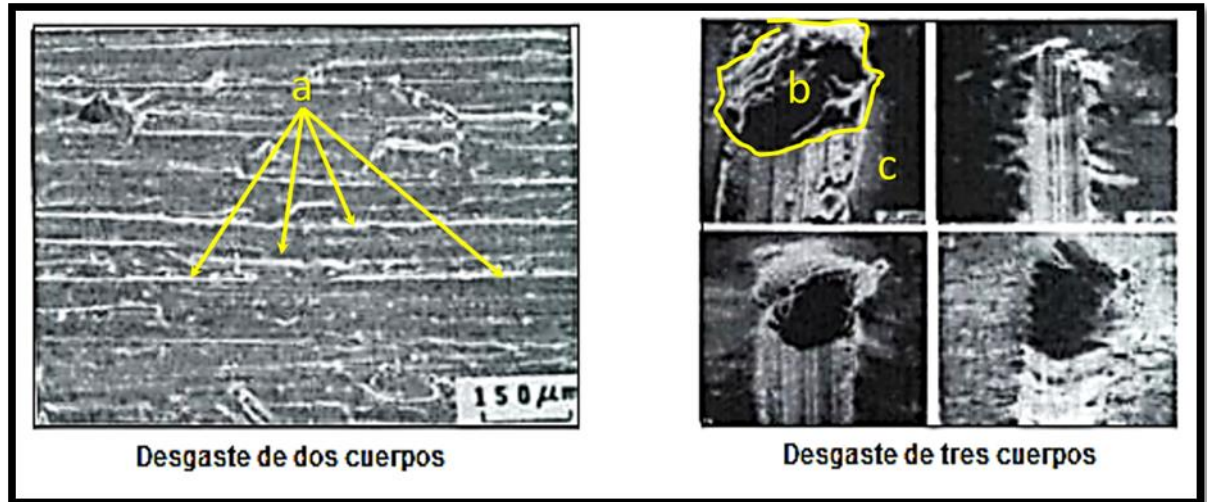
Figura 14 Abrasión por tipo de contacto



Fuente: GONZALEZ H., Andrés Yovanni, 2008 [26]

El daño en la superficie es generado por el rayado o desprendimiento de material tal y como se observa en la Figura 15. En cualquiera de estas formas, se concluye que la superficie no vuelve a ser la misma, razón por la cual se requiere determinar el cambio de forma y la pérdida de volumen para poder tener una medición del desgaste. [27]

Figura 15 Micrografía de desgaste abrasivo



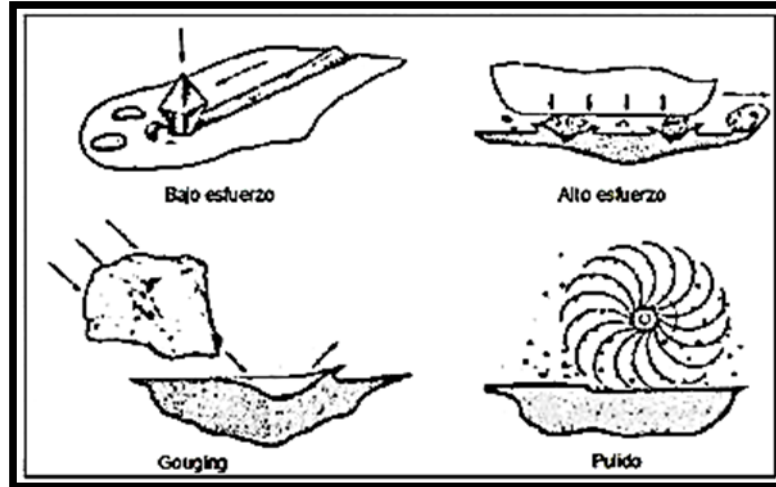
Fuente: LÓPEZ L., Edgar Jesús. 2004 [27]

El desgaste abrasivo entre tres cuerpos es entre 2 y 10 veces menos intenso que el que se produce entre dos cuerpos, debido a que sólo una pequeña cantidad de partículas abrasivas son las generadoras del desgaste. [28]

2.1.1.10.2 Abrasión por nivel de daño generado

- Abrasión de bajo esfuerzo o rayado: Desgaste que ocurre debido a un frotamiento relativamente suave de partículas abrasivas contra superficies o elementos metálicos. Las cargas son suficientemente bajas de tal modo que las partículas no se desintegran o se rompe. Generalmente el daño se presenta en forma de rayado y la deformación superficial es mínima.
- Abrasión de alto esfuerzo o desbaste: Es aquella donde la fuerza ejercida entre las dos superficies es lo suficientemente alta como para triturar las partículas, en este tipo de abrasión aparece la deformación plástica, así como el rayado y el picado de material debido a las partículas presionadas sobre el cuerpo.
- Abrasión por surcos o ranuración (Gouging): Se refiere a la remoción de material debido a la acción repetitiva de altas cargas compresivas producidas por partículas grandes como rocas, dejando a su paso grandes surcos en la superficie gastada.
- Abrasión por pulido: Es un desgaste muy suave donde la abrasión es muy fina, el material se remueve por medio de frotamientos contra otras superficies, el rayado es poco visible y no hay fractura ni deformación plástica.

Figura 16 Clases de desgaste abrasivo



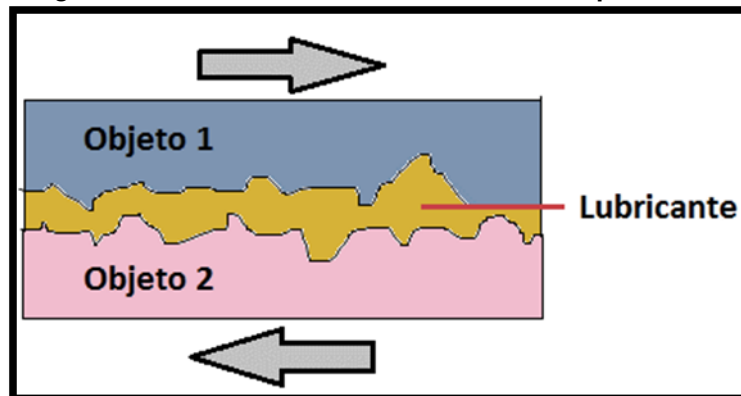
Fuente: LÓPEZ L., Edgar Jesús. 2004 [27]

Lubricación

La lubricación se define como la técnica empleada para reducir el rozamiento entre dos superficies que se encuentran en contacto y que presentan movimiento relativo entre sí.

El propósito de la lubricación es la separación de dos superficies con deslizamiento relativo entre sí, de tal manera que no se produzcan daños asociados a la fricción entre ellas al permitir que el proceso de deslizamiento se realice con el menor rozamiento posible. Lo anterior a través de la aplicación de una película de lubricante de espesor suficiente entre las dos superficies en contacto que ayuda a soportar la carga o presión generada entre las superficies enfrentadas y evitar el desgaste.

Figura 17 Película de lubricante entre dos superficies



Fuente: Autor

2.1.1.11 Funciones de la lubricación

Durante la operación de la lubricación la mayoría de las aplicaciones contemplan que el lubricante realice diferentes tareas durante su operación, entre las cuales encontramos refrigeración, limpieza, protección, entre otras:

Lubricante: Es la principal función –valga la redundancia-, cuyo objetivo es la reducción del rozamiento entre las superficies en contacto, con esto se logra la reducción de la fricción, el desgaste y por ende una mejor transmisión de energía.

Refrigerante: Todo material que permita la reducción de fricción actuará como un refrigerante, por el simple hecho que al reducir la fricción se genera una reducción en la temperatura de operación del componente. Por otra parte, hay maquinaria que a pesar de estar correctamente lubricadas generan grandes cantidades de calor durante su operación, para evitar el sobrecalentamiento, usualmente el lubricante puede transferir el calor de las zonas más calientes hacia zonas más frías. Un ejemplo muy claro de esta aplicación es la aplicación de lubricante/refrigerante sobre un proceso de maquinado, donde el lubricante evita el desgaste excesivo durante el desbaste y a su vez permite evacuar el calor excesivo propio del proceso.

Anticorrosiva: Naturalmente los lubricantes no deben generar corrosión sobre las superficies y por el contrario, lo ideal es que contribuyan a la protección o inhibición de los daños generados por agua, ácidos y demás agentes que puedan contaminar un sistema. La protección anticorrosiva de los lubricantes se presenta de dos maneras: la primera es proveer una barrera física en contra del ataque químico, la segunda es la de neutralizar los químicos corrosivos que se puedan generar durante la operación del equipo.

Mantenimiento o limpieza: La eficiencia de un equipo se puede ver comprometida con la contaminación de sus componentes por agentes ordinarios como el polvo, arena, productos corrosivos o de desgaste. Las partículas sólidas pueden incrementar el desgaste, la corrosión o pueden bloquear los ductos de lubricación y filtros. Durante el proceso de lubricación, los lubricantes contribuyen a la limpieza de los mecanismos, incluso, en algunos casos los lubricantes son complementados con aditivos especializados que permiten la dispersión de partículas contaminantes en el aceite, suspender partículas en el lubricante, agentes antioxidantes, entre otros.

Funciones especiales: En algunas aplicaciones particulares, a los lubricantes se le atribuyen funciones particulares además de las anteriormente mencionadas, entre ellas encontramos funciones como:

- Sellado: Ejemplo claro de ello se encuentra en motores de combustión interna, donde el lubricante también se encarga de sellar los anillos del pistón con las paredes del cilindro.
- Transmisión de potencia: Los aceites hidráulicos son usados para la transmisión y control de potencia, al igual que para la lubricación del sistema hidráulico.
- Aislamiento: En componentes como transformadores eléctricos e interruptores de potencia, usualmente se utilizan aceites de aislamiento.

2.1.1.12 Tipos de lubricantes

Normalmente se contemplan tres clases de lubricantes principalmente:

- Lubricantes líquidos
- Lubricantes sólidos
- Grasas

Lubricantes Líquidos: Este tipo de lubricante es generalmente conocido en la industria como aceites lubricantes, son aceites multiusos y se encuentran divididos en 4 sub grupos:

- Aceites minerales (Obtenidos de la destilación fraccionada del petróleo)
- Aceites vegetales o animales (obtenidos de la Oliva, lino, algodón, tocino, glicerina, etc)
- Aceites compuestos (es una mezcla entre los minerales y los vegetales/animales)
- Aceites sintéticos

Existen diferentes elementos líquidos que se utilizan como lubricantes, sin embargo normalmente los que tienen mayor demanda son los derivados de aceites minerales y los derivados del petróleo o sintéticos.

Los aceites sintéticos son obtenidos mediante procesos químicos, generalmente son seleccionados para aplicar sobre condiciones extremas y especializadas. Por ejemplo, en los motores de aviación donde se requiere resistencia a las altas temperaturas.

Otro tipo de lubricantes son los derivados de aceites naturales provenientes de animales o vegetales, cuyas propiedades lubricantes son excelentes, sin embargo, tienden a degradarse más rápidamente que los aceites minerales. La mayor ventaja de los aceites animales o vegetales radica en su impacto ambiental casi que nulo, puesto que son aceites biodegradables.

3 NORMA ASTM G-65

La norma ASTM G65 es una prueba de laboratorio que presenta los lineamientos que permiten determinar la resistencia de los materiales metálicos a la degradación superficial por fricción mediante una prueba con abrasivo en seco y un disco de goma. El objetivo principal de este ensayo es el de generar datos estandarizados para clasificar los materiales por su resistencia a la abrasión en seco bajo un conjunto específico de condiciones. Los resultados de la prueba de abrasión se reportan como pérdida de volumen en milímetros cúbicos.

En la actualidad se emplean diferentes pruebas de laboratorio, desarrolladas por la ASTM, para evaluar la respuesta del material cuando se encuentra en una situación específica de desgaste, de tal manera que se pueden estudiar y simular distintas situaciones de este proceso. Adicionalmente investiga la naturaleza del daño superficial.

En la tabla 4 se muestran algunos de los ensayos de desgaste estandarizados por la ASTM.

Tabla 4 Tipos de ensayo de desgaste estandarizados por ASTM

NORMA	DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO
D-4172	Prevención del desgaste, características de fluidos lubricantes.
D-4170	Protección al desgaste por rozamiento mediante grasas lubricantes.
G-32	Prueba de erosión por cavitación.
G-65	Ensayo de desgaste abrasivo con arena seca y rueda de caucho.
G-73	Prueba de erosión por choque de líquidos.
G-75	Abrasión en medio húmedo (lodos).
G-76	Erosión por el choque de partículas sólidas mediante chorros de gas.
G-77	Clasificación de la resistencia al desgaste de los materiales, utilizando la prueba de block-on-ring.
G-81	Ensayo de abrasión por ranurado.
G-83	Desgaste por cilindros cruzados.
G-98	Prueba de rozamiento.
G-99	Ensayo Pin on disk.
G-105	Ensayo de desgaste abrasivo con arena húmeda y rueda de caucho.
G-132	Ensayos de abrasión por pin.
G-133	Prueba de desgaste por deslizamiento recíprocante.
G-134	Prueba de erosión por cavitación con chorros de líquido.

Fuente: A.N.J. Stevenson I [19]

El presente proyecto se enfoca exclusivamente en la norma ASTM G-65, la cual es una prueba estándar de desgaste abrasivo con arena seca y rueda de caucho “DSRW” siglas en inglés de (Dry Sand Rubber Wheel) [1]. Este ensayo simula el desgaste abrasivo en seco sobre materiales a través de partículas abrasivas de

características específicas, en condiciones de bajo esfuerzo y de abrasión por tres cuerpos [1, 19].

La norma se encuentra compuesta por 11 capítulos que describen de manera detallada y concisa las características, propiedades y cualidades fundamentales que se requieren en: los componentes principales del dispositivo, el procedimiento de operación de la máquina, el registro de la información obtenida durante el ensayo, el procedimiento de análisis de resultados y el reporte final de los mismos.

1. Alcance
2. Documentos de referencia
3. Terminología
4. Resumen del método de prueba
5. Significado y aplicabilidad
6. Dispositivo y materiales
7. Preparación de las probetas y muestreo
8. Parámetros de prueba
9. Procedimiento
10. Cálculos y reporte de resultados
11. Precisión y tendencia

La tabla 5 muestra los cinco procedimientos estandarizados dentro de la norma ASTM G-65 para ensayos de desgaste abrasivo; los cuales se clasifican de acuerdo a los grados de resistencia al desgaste por abrasión de los materiales o a los espesores de los recubrimientos en los mismos [1]. Adicionalmente, la tabla presenta los parámetros básicos requeridos para efectuar los ensayos, a saber: fuerza ejercida sobre la probeta, revoluciones de la rueda y abrasión lineal (distancia de desgaste).

Tabla 5 Procedimientos para ensayo de desgaste abrasivo, ASTM G-65

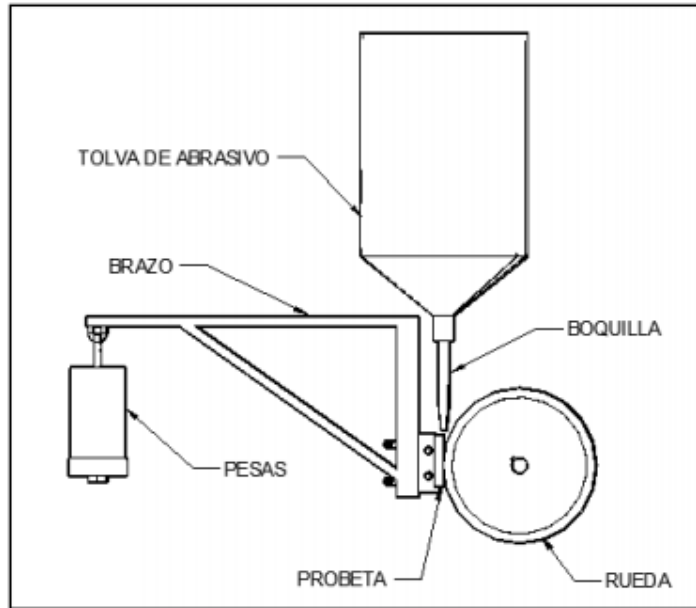
PROCEDIMIENTO ASTM	FUERZA EJERCIDA / PROBETA		REVOLUCIONES DE LA RUEDA	DISTANCIA DE DESGASTE	USOS
	N	Lbf			
A	130	29	6.000	4.309	Materiales con media a extrema resistencia a la abrasión.
B	130	29	2.000	1.436	Materiales altamente resistentes a la abrasión, pero es usado en materiales de media a baja resistencia a la abrasión. Se aplica cuando la pérdida de volumen desarrollados por el procedimiento A exceden los 100 mm ³ .
C	130	29	100	71,8	Para uso en capas delgadas.
D	45	10	6.000	4.309	Se utiliza en materiales con baja resistencia a la abrasión.
E	130	29	1.000	718	Materiales con media o baja resistencia a la abrasión.

Fuente: Norma ASTM G-65 [1]

Descripción general de la máquina según la norma ASTM G-65

De acuerdo a la norma ASTM G-65, el dispositivo para realizar las pruebas de desgaste abrasivo consta principalmente por 7 componentes básicos: una tolva de almacenamiento de material abrasivo, una boquilla dosificadora de material abrasivo, una rueda de acero recubierta con caucho vulcanizado, una palanca para control de la carga sobre la probeta, una masa o contrapeso, una probeta y una fuente de poder.

Figura 18 Esquema general de la máquina de ensayo normalizada por la norma ASTM G-65



Fuente: Autor

El funcionamiento general del dispositivo describe que entre el disco de abrasión y la probeta se mantiene un flujo laminar y constante de abrasivo (arena) que se dosifica a través de la boquilla [1]. El abrasivo es presionado por medio de la palanca con una fuerza constante y definida. La dirección de rotación del disco tendrá el mismo sentido que el flujo de arena [20, 21, 22].

El desgaste abrasivo generado en DSRW puede ser clasificado como arado y rodadura [23, 24]. En el primer caso de desgaste las partículas de arena se embeben en el caucho y aran la superficie ensayada; mientras que en la rodadura las partículas de arena simultáneamente ruedan y deslizan entre el caucho y la superficie ensayada, los bordes irregulares de la arena ejercen elevada presión sobre la muestra causando indentación, deformación plástica y desprendimiento de material [25].

4 DISEÑO CONCEPTUAL

Previo al planteamiento de un diseño conceptual, fue necesario evaluar y analizar las restricciones presentes dentro de la norma en cuanto a las generalidades de operación y algunos de los componentes presentes durante el funcionamiento del dispositivo. Lo anterior permitió identificar aquellos aspectos que la norma presenta parametrizados y caracterizados de manera específica, por tanto, no dan cabida a su modificación o sustitución dentro del proceso de diseño del dispositivo.

Los elementos identificados como inalienables dentro del funcionamiento del dispositivo y que se encuentran detalladamente especificados dentro de la norma son:

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

Conforme con lo anterior, el proceso de diseño se limita en proponer soluciones que permitan la consolidación de un dispositivo de ensayo que incluya la totalidad de los parámetros restringidos y garantice las condiciones ideales para la realización de ensayos de desgaste.

4.1 Requerimientos Internos

Los requerimientos internos son aquellos que, por la naturaleza del ensayo que se realiza con el dispositivo y las características específicas registradas en la norma, requieren su implementación obligatoria dentro del dispositivo sin cabida a modificación alguna:

	<i>Requerimiento Interno</i>	<i>Descripción</i>
1	Potencia transferida al disco	1 HP
2	Velocidad angular del disco	200 +/- rpm
3	Fuerza ejercida sobre las probetas	130/45N (<i>dependiendo del procedimiento</i>)
4	Dosificación de abrasivo	300-400 grs/min
5	Material abrasivo	Arena sílice-tamiz 50/70

4.2 Requerimientos Externos

Los requerimientos externos se presentan como los factores que debe tener el dispositivo conforme con el entorno y usuario final de la máquina: los laboratorios de la USTA y la comunidad estudiantil de los departamentos de ingeniería.

En función de ello, se identifican 3 requerimientos externos, de los cuales uno se encuentra relacionado con la disponibilidad de alimentación eléctrica presente en el laboratorio donde se almacenará el dispositivo (220V), mientras que el otro atiende a la necesidad de seguridad mientras el usuario opera la máquina (seguridad industrial).

	<i>Requerimiento Externo</i>	<i>Descripción</i>
1	Alimentación eléctrica	220V
2	Seguridad industrial	Elementos que permitan la operación segura del dispositivo
3	Costo	Costo total del dispositivo

4.3 Consolidación de los requerimientos

Conforme con la información recopilada entre los Requerimientos Internos y los Requerimientos Externos, se presenta la consolidación de requerimientos presentes dentro del proyecto.

	<i>Requerimientos</i>	<i>Descripción</i>	<i>Origen</i>
1	Potencia transferida al disco	1 HP	ASTM G65
2	Velocidad angular del disco	200 +/- rpm	ASTM G65
3	Fuerza ejercida sobre las probetas	130/45N (<i>dependiendo del procedimiento</i>)	ASTM G65
4	Dosificación de abrasivo	300-400 grs/min	ASTM G65
5	Alimentación eléctrica	220V	Planta física
6	Seguridad industrial	Elementos que permitan la operación segura del dispositivo	Usuario final
7	Costo	Costo total del dispositivo	Usuario final

Pese a que uno de los requerimientos internos y de estricto cumplimiento para la realización del ensayo según la norma es la implementación de material abrasivo de cualidades particulares, se descarta dentro de los requerimientos del

dispositivo puesto que el material abrasivo es un insumo de suministro externo e independiente a la naturaleza del dispositivo.

4.4 Requerimientos de Ingeniería

Los requerimientos de ingeniería son las soluciones técnicas propuestas para alcanzar los requerimientos del cliente. Estos requerimientos se fundamentan también en las posibilidades y alcances reales que se tuvieron para desarrollar el proyecto.

Tabla 6. Requerimientos de ingeniería

Requerimientos Cliente	Requerimientos de ingeniería	Medición
Potencia transferida al disco	Motor reductor de engranajes acoplado a un eje rígido	1 HP
Velocidad angular del disco		193.9 RPM
Fuerza ejercida sobre las probetas	Brazo rígido (<i>diseño sugerido por la norma</i>) con contrapesos desmontables	130/45N
Dosificación de abrasivo	Dosificadora en acero, diseño según norma	300-400 <i>grs/min</i>
Alimentación eléctrica	Motor trifásico	220V
Seguridad Industrial	Elementos de seguridad pasiva	Unidades
Costo	Materiales y componentes	\$

Fuente: Autor

4.5 Benchmarking

Actualmente el mercado nacional no cuenta con la oferta de dispositivos de ensayo de desgaste abrasivo como las que describe el desarrollo del presente proyecto. Sin embargo, son varias instituciones educativas de nivel superior que cuentan con dispositivos de esta naturaleza, los cuales también han sido desarrollados por la comunidad estudiantil en calidad de proyectos académicos y que actualmente se implementan como herramientas de soporte y apoyo a los procesos de aprendizaje de las diversas asignaturas que requieran las cualidades de una máquina de ensayo de desgaste abrasivo de estas características.

En el mercado internacional, encontramos pocas alternativas en cuanto a máquinas que se comercialicen como dispositivos de ensayo bajo estándar

normativo ASTM G65. Sus precios oscilan entre los 8.500 y los 20.000 dólares. Las hay de distintos orígenes, tamaños y configuraciones. Se pueden consultar a través de la internet con distintos nombres como *dry sand/rubber wheel apparatus*, *sand wheel abrasion tester*, *ASTM G65 tester machine*, entre otros relacionados. Entre las alternativas comerciales encontradas se tienen las siguientes máquinas:

MTT (EE.UU)

Material Testing Technology (MTT) – ASTM G0065.10/ Sand Wheel Abrasion Tester

Fabricada bajo pedido en los Estados Unidos por la empresa Material Testing Technology (MTT), este dispositivo de ensayo de desgaste abrasivo en seco se construye conforme con los lineamientos y requerimientos de la norma ASTM G65.

Sus principales características son:

- Tablero electrónico con previa programación de las diferentes modalidades de ensayo que describe la norma ASTM G65.
- Cuenta con un motor trifásico de 2HP acoplado a variador de frecuencia que permite alcanzar las velocidades angulares que requiere la norma en sus diversas modalidades de ensayo.
- Dimensiones: 110 cm (alto) x 95 cm (ancho) x 60 cm (largo)
- Peso total: 150 kg
- Fabricado en acero, acero templado, aluminio, acrílico y caucho.
- Precio: USD \$16.925



Figura 19 MTT ASTM G0065.10/ Sand Wheel Abrasion Tester

Fuente: www.mttusa.net

LGM-130 (China)

LGM-130 Dry Sand Rubber Wheel Abrasion Tester, Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus ASTM G65

Dispositivo fabricado en la China, permite realizar ensayos de desgaste abrasivo según lineamientos de la norma ASTM G65, o su equivalente asiático JBT7705-1995.

Sus principales características son:

- Motor trifásico de 1HP
- Cuenta con tacómetro digital
- Dimensiones: 710 mm (largo) x 740 mm (ancho) x 1600 mm (alto)
- Peso: 420 kg
- Precio: USD \$8.500

Figura 20 LGM-130



Fuente: www.aliexpress.com

FALDEX (Bélgica)

FALDEX – Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus

Este dispositivo de origen belga cuenta con 30 años de desarrollo, lo posiciona como la única unidad estandarizada en el mercado. Cuenta con una serie de accesorios adaptables que le permiten ampliar su operatividad para abarcar los requerimientos de las normas ASTM B611 y la G105.

Características principales:

- Control variable de velocidad angular través de un pequeño tablero de control.
- Permite adaptar accesorios para realizar ensayos conforme con normas ASTM B611 y G105.
- Motor monofásico de 200V y 1,5HP
- Dimensiones: 150 mm (alto) x 100 mm (ancho) x 60 mm (largo)
- Peso: 150 kg
- Precio: USD \$12.500

Figura 21 FALDEX - Dry rubber/sand wheel apparatus



Fuente: www.falex.com

4.6 Contraste del Benchmarking

El análisis del BENCHMARKING se realiza frente a los Requerimientos del Cliente, evaluando la capacidad de cada uno de los dispositivos para cumplir individualmente con cada requerimiento propuesto.

Para lo anterior, se desarrolla el siguiente criterio de evaluación para calificar las aptitudes de los dispositivos frente a los requerimientos:

BAJO CUMPLIMIENTO	1
MEDIO CUMPLIMIENTO	3
ALTO CUMPLIMIENTO	5

El desarrollo que contrasta el BENCHMARKING se presenta a continuación:

Tabla 7. Comparación de Benchmarking

Requerimientos del Cliente	USTA	MTT	LGM-130	FALDEX
Potencia transferida al disco	5	5	5	5
Velocidad angular del disco	5	5	5	5
Fuerza ejercida sobre las probetas	5	5	5	5
Dosificación de abrasivo	5	5	5	5
Alimentación eléctrica	5	5	5	5
Seguridad industrial	5	5	3	5
Costo	5	1	3	1

Fuente: Autor

Como resultado del contraste Benchmarking, encontramos que la evaluación de los requerimientos tenía una calificación máxima de 35, donde los dispositivos se calificaron de la siguiente manera:

	MTT	LGM-130	FALDEX	USTA
<i>TOTAL</i>	31	31	31	35

Entre los resultados obtenidos del benchmarking, se acentúa la calificación del dispositivo USTA, debido a que su bajo costo y estructura robusta se destaca de manera muy acertada frente al resto de la competencia.

Lo anterior principalmente debido a que el dispositivo USTA cuenta con un diseño más analógico y mecánico que involucra muy pocos componentes de carácter electrónico y digital, favoreciéndole en materia de durabilidad y resistencia frente al resto de los dispositivos. Otro de los factores directamente influyentes en la calificación es el costo total del dispositivo, siendo el dispositivo USTA la opción más económica frente a la competencia.

5 DESARROLLO CENTRAL

Dado que el alcance de la norma presenta restricciones y especificaciones detalladas sobre algunos de los componentes principales del dispositivo para ensayo de desgaste abrasivo, la primera etapa del desarrollo del proyecto comprende la identificación de aquellas piezas que ya se encuentran establecidas (o sugeridas) por la norma, componentes que no son susceptibles a modificaciones y por tanto se procede directamente con su fabricación. Por otra parte, se encuentra una serie de elementos complementarios al funcionamiento del dispositivo, los cuales admiten un grado de selección de alternativas para su utilización.

5.1 Elementos condicionados por la norma ASTM G65

El capítulo 6 de la norma ASTM G65 (*Apparatus and Material*), describe detalladamente las características puntuales requeridas para los componentes funcionales y críticos del dispositivo.

“Several elements are of critical importance to ensure uniformity in test results among laboratories. These are the type of rubber used on the wheel, the type of abrasive and the shape, positioning and the size opening of the sand nozzle, and a suitable lever arm system to apply the required force.”¹

Traducción: *Varios elementos son de importancia crítica para garantizar la uniformidad en los resultados de las pruebas entre los laboratorios. Estos son el tipo de caucho utilizado en la rueda, el tipo de abrasivo y la morfología, el posicionamiento y el tamaño de abertura de la boquilla dosificadora, y el sistema de palanca adecuado para aplicar la fuerza requerida.*

Conforme con lo anterior y remitiéndose directamente a la información suministrada por la norma, se procede con la caracterización de los siguientes elementos:

- ❖ Disco de abrasión
- ❖ Material abrasivo
- ❖ Boquilla dosificadora
- ❖ Sujetador de probetas
- ❖ Brazo

¹ Norma Técnica ASTM G-65/00. *Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*, American Society for Testing and Materials 2000. Pág 2.

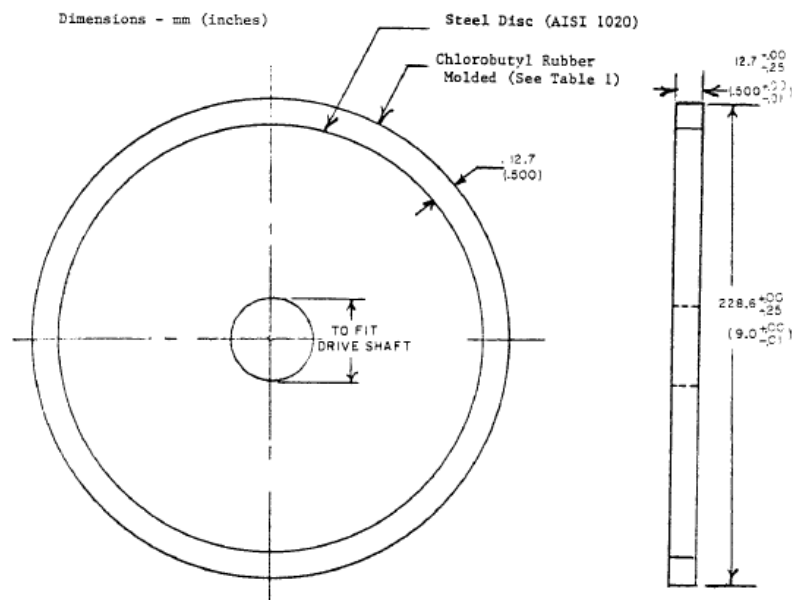
Disco abrasivo con recubrimiento en caucho según especificaciones de la norma.

El disco abrasivo consiste en un núcleo de acero con un recubrimiento perimetral en caucho de clorobutilo. La dureza sugerida para el recubrimiento de caucho es A60, sin embargo, el rango admisible permite durezas entre 58 y 62.

La información detallada del disco se extrae directamente del registro presente en la norma ASTM G-65, donde se tiene que:

- Disco en acero 1020 cuyo diámetro es de 8" y espesor de 0.5"
- Recubrimiento en caucho con espesor y anchura son de ½ "

Figura 22. Disco de abrasión



Fuente: Norma ASTM G-65 [1]

El recubrimiento en caucho debe ser de Cloro butilo (CIIR), su espesor debe ser de ½ ", y las propiedades del mismo se encuentran descritas por la norma de la siguiente manera:

Figura 23. Formula del Caucho de clorobutilo (CIIR) ^A

NOTE 1—Specific gravity of mix: 1.15. Pressure cure: 20 min at 160°C (320°F).

Materials	Proportions by Weight
Chlorobutyl No. HT 10-66 (Enjay Chemical)	100
Agerite Staylite-S	1
HAF black	60
Circolight oil	5
Stearic acid	1
Zinc oxide	5
Ledate	2

^A The sole source of supply known to the committee at this time is Action Rubber Co., Inc., 601 Fame Rd., Dayton, OH 45449. If you are aware of alternative suppliers, please provide this information to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend.

Fuente: Norma ASTM G-65 [1]

Debido a que las especificaciones puntuales que exige el material indicado en la norma no pudieron ser suministradas por ningún proveedor local, se realizó una caracterización de las propiedades principales del Caucho de Clorobutilo expuesto en la ASTM G65, posteriormente se procedió a ubicar un material cuyas propiedades sean equivalentes, que se encontrase disponible comercialmente y que atienda a los requerimientos de la norma.

En una consulta dirigida a los ingenieros de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas sede Bogotá, y a los Ingenieros de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, encargados de la fabricación de dispositivos de ensayo bajo norma ASTM G-65 de características idénticas a las de la máquina desarrollada en este documento. Manifestaron que se le presentó el mismo inconveniente frente a la adquisición del caucho. En ambos casos, los ingenieros de ambas universidades implementaron el caucho NBR 60 para la construcción de sus máquinas, puesto que es un material comercialmente accesible y cuyas propiedades se aproximan significativamente a las del material solicitado por la norma.

“The optimum hardness of the cured Rubber is Durometer A-60. A range from A58 to 62 is acceptable”²,

² ASTM G-65, *Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*. 2001, pág 2.

Tabla 8 Principales Propiedades Mecánicas de los Cauchos

Nombre Comercial	Componente Activo	DUREZA	Temperatura De Servicio	Resistencia a Tracción	Alargamiento de Rotura
		Shore A	°C	Mpa	%
CIIR	Clorobutilo	60	120	18	620
NBR 60	Acrilonitrilo Butadieno	60 ± 2	100	14	580

Figura 24. Disco de abrasión



Fuente: Autor

En la **figura 24**, se presenta el disco de abrasión construido para el dispositivo del proyecto en curso, listo para ser instalado una vez sea retirado el plástico protector para el caucho.

Dosificadora de material abrasivo según norma.

Este componente se encuentra descrito al detalle por parte de la norma, la cual propone un diseño que garantiza el suministro de material abrasivo de manera laminar constante para el desarrollo de las pruebas. (Ver figura 25)

Respecto al material para la fabricación de la boquilla dosificadora, la norma indica que:

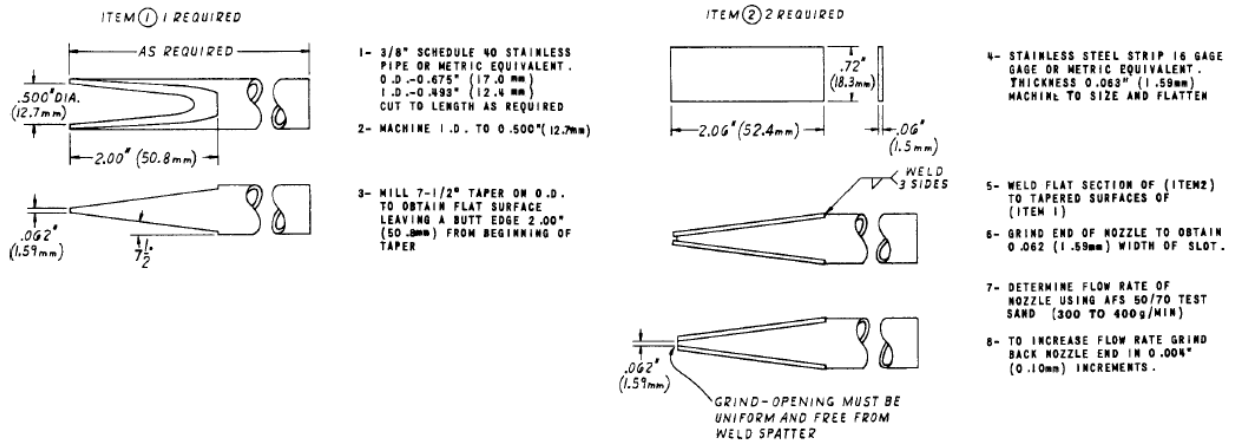
“Any convenient material of construction that is available as welded or seamless pipe may be used for the construction of the fabricated nozzle. Stainless steel is preferred because of its corrosion resistance and ease of welding. Copper and steel are also used successfully.”³

³ Norma Técnica ASTM G-65/00. *Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*, American Society for Testing and Materials 2000. pág 4.

Traducción: Cualquier material de construcción conveniente que esté disponible como tubería soldada o sin costura se puede usar para la construcción de la boquilla dosificadora. Se prefiere el acero inoxidable debido a su resistencia a la corrosión y facilidad de soldadura. El cobre y el acero también se usan con éxito admisible.

Los parámetros para la construcción de la boquilla dosificadora se encuentran descritos por la norma, sin embargo, la misma sugiere que cualquier geometría y configuración es aceptada para la boquilla siempre y cuando conserve las dimensiones rectangulares específicas para la apertura (12.7mm x 1.57mm), además de permitir el caudal de material abrasivo requerido (300-400 g/min).

Figura 25. Especificaciones para la fabricación de la boquilla



Fuente: Norma ASTM G-65 [1]

Para el presente proyecto, la fabricación de la dosificadora se realiza acorde al diseño planteado por la norma, resultando en un hermoso ejemplar que cumple a cabalidad con todas las exigencias y recomendaciones planteadas por la ASTM G-65.

Figura 26. Boquilla dosificadora fabricada



Fuente: Autor

Los planos de fabricación de este componente se encuentran anexos al presente documento

5.1.1.1 Suministro de material abrasivo

El suministro del material abrasivo se realiza a partir de una tolva con capacidad superior o igual a 19 litros según lo requiere la norma ASTM G-65. La tolva desemboca con una manguera plástica de $\frac{3}{4}$ " de diámetro que se encuentra acoplada a una válvula de paso para permitir o restringir el flujo de material abrasivo. Finalmente, la dosificación de material abrasivo se realiza a través de la boquilla dosificadora cuyas especificaciones están descritas por la misma norma.

Pese a que la norma indica que la tolva debe contener un mínimo de 19L de arena de sílice, la razón de dicho requerimiento atiende los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned}\text{Flujo máximo durante la prueba} &= 400 \text{ g/min} \\ \text{Duración de la Prueba} &= \text{Modalidad de prueba más larga } 30\text{min} \\ \text{Densidad de la Arena} &= 1.6 \text{ L / kg}^4\end{aligned}$$

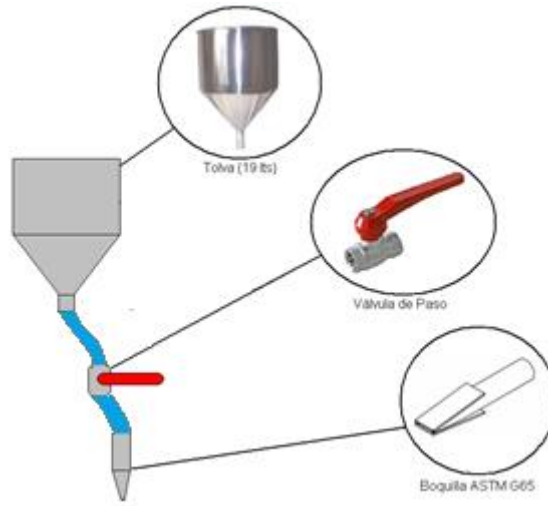
De esta manera:

$$\begin{aligned}&= (400 \text{ g/min})(30 \text{ min}) \rightarrow 12000 \text{ g} = 12 \text{ kg} \\ &(12 \text{ kg})(1.6 \text{ L/kg}) = 19.2 \text{ L}\end{aligned}$$

Nota: Cabe señalar que el volumen necesario de arena es proporcional al tiempo de duración de la prueba, así que los datos pueden variar acorde a la modalidad de la prueba.

⁴ Disponible en Línea: <http://www.arenasilice.com/productos/arena-silice/>

Figura 27. Esquema general del sistema de suministro de material abrasivo



Fuente: Autor

El sistema de suministro de material abrasivo debe alcanzar un flujo laminar constante, mientras permite un caudal entre 300 y 400g/min. [1]

Figura 28. Flujo laminar constante



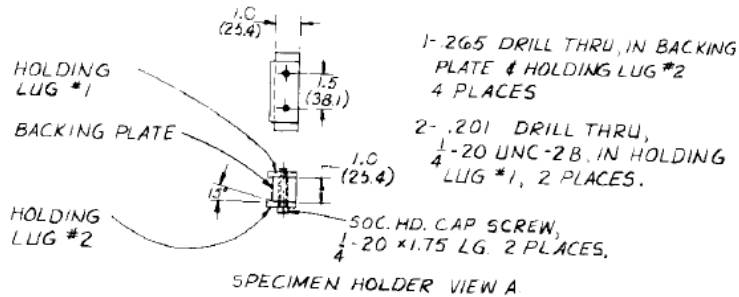
Fuente: Autor

Finalmente, el material abrasivo es recogido por gravedad a través de un embudo inferior, que lo deposita en un recipiente para su reutilización.

Elementos de sujeción de las probetas

La norma presenta un esquema muy básico sobre el mecanismo con el que se deben sujetar las probetas.

Figura 29. Sujetador de probetas



Fuente: Norma ASTM G65 [1]

De lo anterior, se puede extraer la información referente al ancho del apoyo para las probetas (1"), la cantidad de perforaciones y la distancia entre los tornillos sujetadores (1.5"), los tornillos sujetadores (diam=1/4") y el ángulo con el que las platinas sujetadoras deben retener la probeta (15°).

De acuerdo con lo anterior, se procede a fabricar un sujetador de probetas que cumpla con los requerimientos que exige la norma, agregando un apoyo en la parte inferior para evitar el desplazamiento vertical de la probeta.

Figura 30. Sujetador de probetas



Fuente: Autor

Los planos de fabricación de este componente se encuentran anexos al presente documento

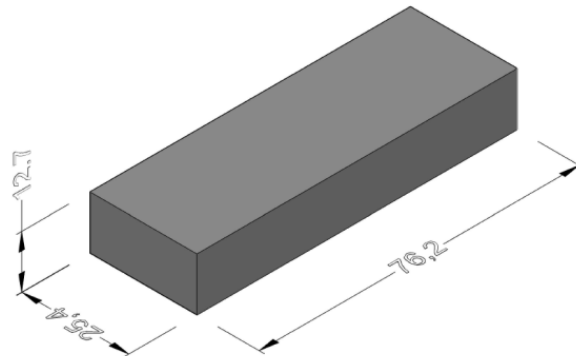
Las platinas o láminas para sujetar lateralmente a las probetas, se cortaron a partir de lámina en acero calibre 12, cortadas y perforadas estrictamente según lo requiere la norma.

Probetas

Conforme con lo registrado en el numeral 7 de la norma **Preparación de las probetas y muestreo**, no existe una limitante definitiva para las dimensiones de las probetas, puesto que su tamaño puede variar de acuerdo a las necesidades del usuario, sin embargo, el tamaño sugerido que se adapta a la perfección al diseño general propuesto por la norma es de:

Ancho	1" (25.4mm)
Alto	3" (76.2mm)
Espesor	0.5 (12.7mm)

Figura 31. Dimensiones probeta



Fuente: Autor

Brazo

De acuerdo con lo estipulado en la norma ASTM G-65, la fuerza que se agrega al montaje se debe realizar a 508mm de distancia respecto al punto de pivote o bisagra tal como se muestra en la **figura 32**. Para ello, la propia norma presenta un esquema en el que se especifican las dimensiones que podrían tener los componentes de la máquina, sin embargo, cualquier configuración que garantice las condiciones de carga requeridas por la norma puede ser utilizada para la construcción del dispositivo de prueba.

SAND HOPPER
W/COVER
5 GAL. (18.9 L)

LEVER ARM
(5×1.25)
(12.7×31.8)

SLEEVE SHAFT W/BEARING
IN LINE WITH SURFACE -X-

ENCLOSURE

STOP REST
($\frac{3}{8}$ DIA. $\times$ 3 LG.)
(12.7 DIA. $\times$ 76.2 LG.)

20
(508)

8
(203)

10.0
(254)

9
(229)

3
(76)

35°

1.25
(31.8)

2.5
(63.5)

PLASTIC TUBING

MOUNTING BRACKET

SAND NOZZLE

MOTOR DRIVE SHAFT

RUBBER RIM

STEEL DISC

SPECIMEN HOLDER
(SEE VIEW A)

WEIGHT

MOUNT SLEEVE SHAFT, STOP REST
AND SAND NOZZLE BRACKET TO
BACK PLATE OF ENCLOSURE

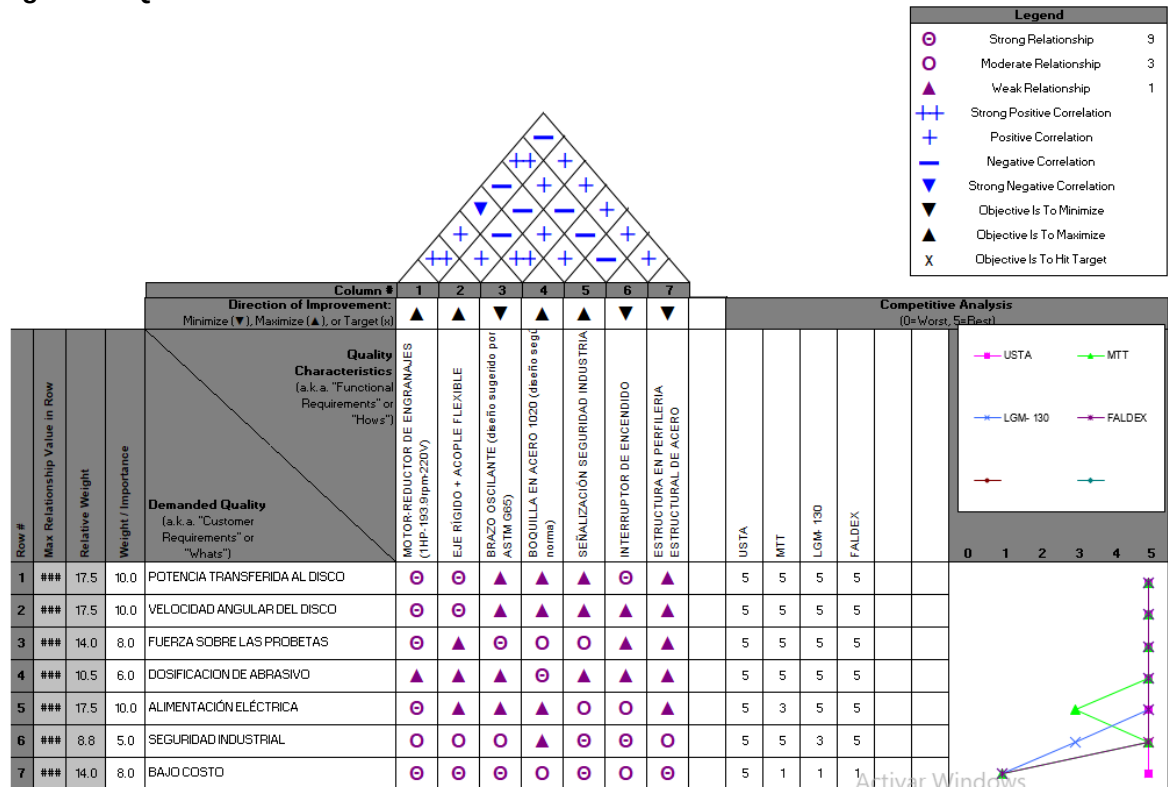
Para el proyecto en curso, se atiende al esquema que presenta la norma, resultando en un mecanismo para la aplicación de la carga de la siguiente manera:

Luego de una validación teórica del diseño en donde se considera la masa del brazo acorde al material en que se fabricó, se concluye que el diseño es funcional siempre y cuando la masa o carga sea de 5.25kg para garantizar los 130N, y de 1.8kg para alcanzar los 45N que exige la norma. Dicha masa será soportada por un gancho – perno o gancho metálico sujeto al brazo.

54

permiten alcanzar dichos requerimientos. Al mismo tiempo, esta metodología permite comparar cualitativamente el Benchmarking sobre los mismos parámetros, concluyendo en una acertada calificación de los diferentes competidores del dispositivo objeto del presente trabajo académico.

Figura 34. QFD



Fuente: Autor

5.2 Evaluación de alternativas

En principio, es necesario destacar que la norma ASTM G65 contiene una serie de restricciones para muchos de los componentes del dispositivo, por lo que, para consolidar la información contenida en el QFD, se realiza una evaluación de alternativas para los elementos que no se encuentran restringidos por la norma y de esta manera proponer un diseño en detalle que cumpla con los requerimientos del cliente y los lineamientos de la ASTM G65.

REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE	
A	POTENCIA TRANSMITIDA AL DISCO
B	VELOCIDAD ANGULAR DEL DISCO

C	FUERZA SOBRE LAS PROBETAS
D	DOSIFICACIÓN DE ABRASIVO
E	ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA
F	SEGURIDAD INDUSTRIAL
G	BAJO COSTO

Inicialmente, se realiza la evaluación de los aspectos más generales relacionados con la construcción del dispositivo y que no se encuentran restringidos por la norma ASTM G 65, entre ellos encontramos el componente estructural y la configuración exterior del dispositivo, para ello se evalúa lo siguiente:

Transmisión de Potencia

Debido a que en la Norma ASTM G-65 sugiere que la transmisión de potencia debe hacerse desde un motor eléctrico de 1HP a 1800rpm, acoplado a una transmisión reductora cuya relación debe ser de 10 a 1. En principio se planteó la posibilidad de implementar un Variador de Frecuencia, pero finalmente después de realizar un análisis comparativo, se descartó la posibilidad de utilizar éste como dispositivo reductor de velocidad y se implementó un reductor mecánico de engranajes *helicoidales*.

Tabla 9. Evaluación de alternativas para la transmisión de potencia

Requerimiento Objetivo	Alternativas		
A, B, E, G	Variador Electrónico 	Motor. Reductor	
		Sinfín-Corona 	Helicoidal 

Fuente: Autor

5.2.1.1 Variador de Velocidad Electrónico

VARIADOR DE FRECUENCIA: Un Variador de Frecuencia o VFD por sus siglas en inglés (*Variable Frequency Drive*), es un dispositivo electrónico que sirve para

el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna (AC) por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor [14]

La velocidad (n) en el eje de un motor trifásico o en cualquier motor asincrónico, depende –principalmente- del número de polos magnéticos del motor y de la frecuencia (Hz), de la red de suministro:

$$n = 60 \frac{f}{2p}$$

Donde: n = Velocidad angular (rpm)

f = Frecuencia (Hz)

2p = Número de pares de polos magnéticos del motor

De esta manera se calcula la velocidad del eje del motor. Sin embargo, existe una ligera diferencia entre la velocidad teórica ($n_{sincrónica}$), y la velocidad de giro real ($n_{asincrónica}$).

$$n_{sincrónica} > n_{asincrónica}$$

Ésta diferencia se denomina *deslizamiento* (σ ó s), que se expresa en porcentaje o en valor absoluto.

Por ejemplo, para la aplicación en curso, se utiliza un motor trifásico de 1HP / 1800rpm a 60Hz según el fabricante, realmente el motor cuenta con una velocidad en el eje de 1750rpm, lo que implica que el *deslizamiento* = 2.77%

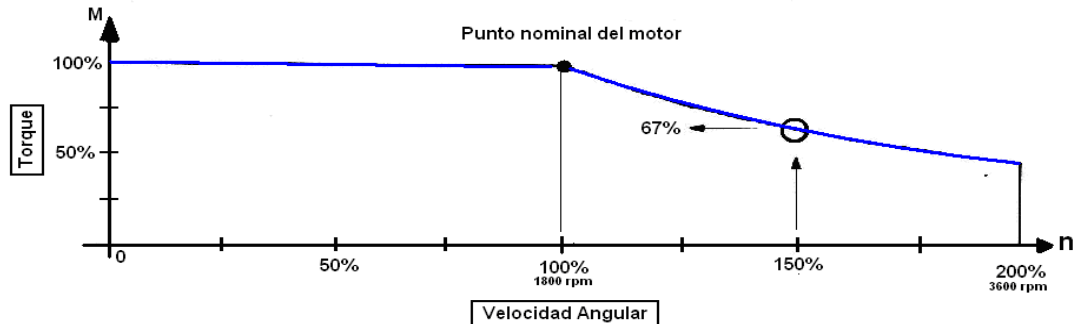
Los motores se fabrican para trabajar a una velocidad nominal o de trabajo determinada. Al implementar un variador de frecuencia, se puede controlar la velocidad del eje del motor. Por ejemplo: El motor que se implementa en la máquina para ensayos de desgaste abrasivo, es un motor que gira a 1750rpm (asincrónicas) a 60Hz y es un motor de 4 polos. Este mismo motor podría girar con variaciones de frecuencia entre 6 y 130Hz a velocidades comprendidas entre:

$$n = 60 \frac{f}{2p} \quad \Rightarrow \quad n_{min} = 60 \frac{6Hz}{2p} \rightarrow 180rpm$$

$$n_{max} = 60 \frac{130Hz}{2P} \rightarrow 3900rpm$$

Pese a que la reducción en la velocidad atiende a una necesidad de 10 a 1, los variadores de frecuencia cuentan con la capacidad de realizar esta reducción de velocidad sin sacrificar el Torque o Par en el eje del motor (Ver Figura 26).

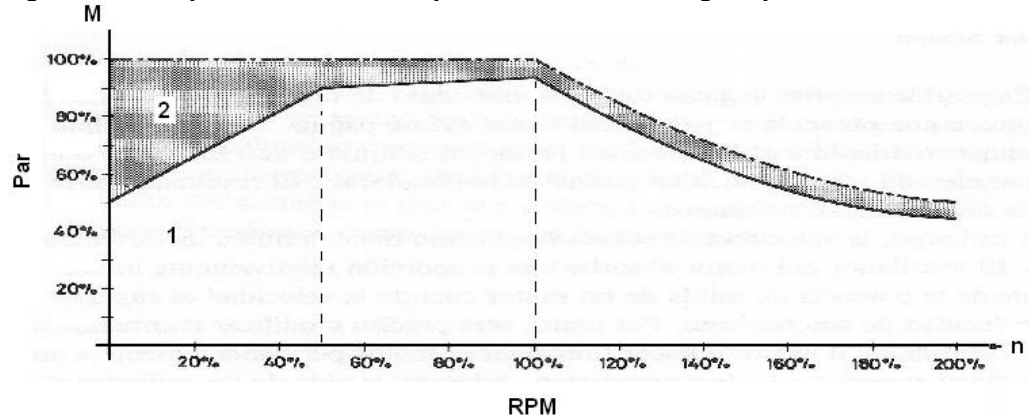
Figura 35. Torque Vs Velocidad Angular



Fuente: Variadores de Frecuencia [14]

Sin embargo, la reducción excesiva de velocidad en el motor replica sobre la temperatura de operación en el mismo. Los motores llevan incorporado un ventilador que refrigera al motor en condiciones normales; al estar instalado en el propio rotor, el ventilador gira a la misma velocidad que el motor y al utilizar un variador de frecuencia para inducir al motor a girar en velocidades lentas ($v < 600rpm$), el ventilador pierde eficacia, y en consecuencia, la temperatura del motor podría aumentar excesivamente. [14]

Figura 36. Temperatura del Motor (Par Vs Velocidad Angular)



Fuente: Variadores de Frecuencia [14]

Mientras que la relación Par – Velocidad se mantenga sobre la zona 1, la temperatura del motor se mantiene dentro de los parámetros normales de funcionamiento; en cambio, si el motor opera dentro de la zona 2 (*Par inferior al 50%*) la temperatura del motor aumenta y se requiere de un sistema de refrigeración adicional para mantener el motor dentro de parámetros normales de funcionamiento. [14]

Si bien los variadores de frecuencia son una alternativa atractiva para utilizarlos como reductores de velocidad, hay que evaluar las ventajas y las desventajas que presentan al involucrarlos en el desarrollo de la máquina en curso:

Tabla 10 Ventajas y Desventajas de los VFD

VENTAJAS	DESVENTAJAS
• Variación de la velocidad del motor sin realizar cambios en el montaje (versatilidad). • Permite la lectura en tiempo real de las condiciones en que se encuentra trabajando el motor. • Es una protección adicional para el motor. • El consumo de energía es menor, puesto que el consumo es directamente proporcional a la exigencia del motor.	• Requiere de un sistema de refrigeración adicional. • La instalación, programación y mantenimiento, requieren de personal capacitado. • Requiere de un aislamiento especial, puesto que puede generar interferencias en la red eléctrica y afectar a otros dispositivos. • Muy sensible a la humedad y al ambiente. (agua, grasas, vapores, etc) • Costo significativamente mayor a una configuración motor-reductor.

Fuente: Autor

En la actual aplicación, se descarta la posibilidad de utilizar este tipo de reductor de velocidad en la máquina, debido principalmente a los siguientes factores:

- La propia norma sugiere la reducción de la velocidad a partir de una transmisión mecánica (*GEARBOX*). [1]
- Por las condiciones del ensayo, requeriría de un sistema adicional de refrigeración para el motor, generando sobre costos.
- Por disponibilidad de espacio, la máquina permanecerá en el laboratorio de soldaduras, expuesta a los gases y vapores inherentes al proceso de soldadura. Condiciones potencialmente desfavorables para un dispositivo electrónico de estas características.
- El costo de adquisición es significativamente superior al de un reductor mecánico, puesto que además del costo del VFD, debe complementarse – al menos para esta aplicación- con un tablero de control para su operación.

5.2.1.2 Reductor de velocidad mecánico

CAJA REDUCTORA: Es un dispositivo que –generalmente- se compone por un conjunto de engranajes, con el que se consigue mantener una velocidad rotacional de salida inferior a la velocidad rotacional de entrada. Existen en diversas configuraciones mecánicas, tamaños y capacidades.

Para la aplicación en curso, se evaluó la posibilidad de utilizar un motor-reductor sinfín – corona, o un motor-reductor de engranajes helicoidales. Debido a que por tamaño, disponibilidad y características de la aplicación, son los que mejor se adaptan a las necesidades del proyecto.

Pese a que ambos cuentan con las características propias para la implementación en la máquina para ensayos de desgaste abrasivo en seco, el factor diferenciador se limita únicamente al costo, puesto que el reductor de engranajes helicoidales es significativamente más costoso que un reductor de sinfín – corona.

A pesar que en el mercado se encuentran empresas que construyen reductores mecánicos a medida, comercialmente existen reductores cuyas relaciones están estandarizadas (10:1, 15:1; 20:1, etc), para la aplicación en curso, la norma ASTM G-65 estipula que el motor debe ser de 1HP a 1800rpm, acoplado a un reductor cuya relación debe ser de 10:1. [1]

Figura 37. Motor-reductor configuración sinfin - corona



Fuente: BASTAN. Suministros industriales ⁵

A pesar que en la sección **9.10 (Wheel Design Procedure)** de la norma ASTM G-65, se indica que la velocidad de rotación del disco debe ser de 200rpm, es la misma norma la que se contradice al sugerir un motor reductor de relación 10:1 para un motor que trabaja a 1800rpm [1], puesto que atendiendo dicha sugerencia la velocidad de rotación del disco estaría entre 170 – 180rpm dependiendo del desplazamiento del motor.

Inicialmente, se evaluó la posibilidad de utilizar un motor reductor sinfín corona que entregaba 176.35rpm al eje de salida, debido a que no se había podido cotizar uno que cumpliera con las 200rpm (+ o -10rpm) que sugiere la norma. Para ello, era necesario realizar un ajuste a los parámetros de prueba expuestos en la norma, puesto que estos se encuentran calculados a partir de una velocidad de rotación de 200rpm en el disco de abrasión. Los ajustes se realizan a partir de una velocidad rotacional real de 176.35rpm en el disco de abrasión, lo que extendería el tiempo para cada una de las pruebas.

⁵ Disponible en Línea: <http://www.bastan.es/pagproductos/reductores.htm>

Tabla 11 Parámetros de la Prueba (ORIGINALES)

Procedimiento Específico	Carga N	Revoluciones del Disco	Abrasión Lineal m	Tiempo de Prueba min
A	130	6000	4309	30
B	130	2000	1436	10
C	130	100	71.8	0.5
D	45	6000	4309	30
E	130	1000	718	5

Fuente: Autor

Tabla 12 Parámetros de Prueba (AJUSTADOS)

Procedimiento Específico	Carga N	Revoluciones del Disco	Abrasión Lineal m	Tiempo de Prueba min
A	130	6700	4309	34
B	130	2265	1436	11.5
C	130	188	71.8	1
D	45	6700	4309	34
E	130	1176	718	6

Fuente: Autor

De esta manera, al contemplar la velocidad real de 176.35rpm en el disco, éste debe realizar más revoluciones para alcanzar la abrasi3n lineal que requiere la norma. Esto se logra incrementando el tiempo de la prueba como lo indica la **Tabla 11**.

Finalmente, se encontr3 el motor reductor que cumpli3 con las 200(+ o – 10rpm) que sugiere la norma, por lo que no hubo necesidad de intervenir los valores propuestos en la **Tabla 12**. Sin embargo, el motor reductor que se implement3, consta de una configuraci3n de engranajes helicoidales coaxiales, configuraci3n diferente a la que sugiere la norma; no obstante, la norma no limita en cuanto a la aplicaci3n de cualquier otro tipo de reductores de velocidad.

Figura 38. Motor-reductor de engranajes helicoidales coaxiales



Fuente: Zhejiang Tianmai Transmission Machinery Co⁶

⁶ Disponible en L3nea: <http://www.tianmaireductor.com/products>

Pese a que el motor-reductor que se utiliza en la aplicación en curso no es el mismo que presenta la **figura 37**, el principio de funcionamiento es el mismo al descrito en dicha imagen.

La información general o ficha técnica del motor-reductor que se instaló para la aplicación en curso, fue suministrada directamente por el proveedor INDUSTRIAS RAMFE S.A.S, quienes presentan la información detallada de las características del equipo y que además corresponden con los requerimientos de la norma:

Tabla 13. Ficha técnica del motor-reductor seleccionado

Ítem	Referencia	Descripción	Eje de salida	Motor		Rel.	Vel. de salida N2 (rpm)	Par de salida M2 (Nm)	FS
				Pot. HP (KW)	Vel. rpm				
1	RG02-212-8.87-4WCE-B3	Motorreductor Ramfé tipo helicoidal coaxial, montaje con patas; con motor para propósito general marca WEG, 220/440 VAC, 3~, 60 Hz, aislamiento clase F, TEFC e IP55.	Macizo Ø25mm con rosca M8x19mm.	1.0 (0.75)	1750.	8.87:1	193.9	36.7	4.2

Fuente: Industrias Ramfe S.A.S

5.2.1.3 Mecanismo de encendido de la máquina

El accionamiento de la máquina se resume en el sistema de encendido para el motor eléctrico. La evaluación de alternativas tuvo un impacto definitivo una vez se descartó la posibilidad de incluir un VFE (Variador de Frecuencia Eléctrico), puesto que el mecanismo para accionar un sistema donde se incluye un variador de frecuencia es mucho más complejo que el accionamiento para un motor reductor.

Para el proyecto en curso, el encendido se realiza mediante la operación de un interruptor industrial o pulsador. Éste simple dispositivo es el encargado de permitir o suspender el suministro eléctrico del motor, aportando seguridad al sistema puesto que no es necesario que el operario manipule una conexión directa al suministro eléctrico (220V) cada vez que se desee operar la máquina.

Figura 39. Pulsador de encendido y apagado.



Fuente: PROMELSA ⁷

⁷ Disponible en Línea: <http://www.promelsa.com.pe/producto>

Material de la estructura

Dado que el dispositivo fue construido en las instalaciones de la empresa INCA FRUEHAUF en la ciudad de Bogotá, empresa del sector metal mecánico dedicada al diseño y fabricación de semirremolques de múltiples ejes para múltiples usos entre los cuales se destacan: tanques para transporte de combustible, volcos para el transporte de arena, tolvas para transporte de cemento, furgones, plataformas de carga, entre muchos otros. La materia prima disponible y las herramientas especializadas presenten sugerían el acero como el material óptimo para la construcción del componente estructural del dispositivo.

Para la selección adecuada del material estructural con el que se construyó el dispositivo fue necesario considerar las características propias para el funcionamiento de la misma, junto con el ambiente de trabajo en que se va a desempeñar.

Algunas consideraciones adicionales para la selección de este componente fueron:

- De acuerdo con el funcionamiento de los componentes y la configuración general de la máquina, se descarta la presencia de cargas variables y vibraciones significativas durante el funcionamiento de la misma.
- Se considera que la máquina va a permanecer en los laboratorios de la USTA, por lo que se descarta el desgaste y degradación de la misma a causa de la intemperie.
- La temperatura de almacenamiento y de operación de la máquina corresponden a la temperatura ambiente.
- Las condiciones ambientales en las que va a permanecer la máquina, no contienen agentes químicos corrosivos ni perjudiciales para los componentes estructurales.

Por lo anterior, se concluye que no se tiene el requerimiento de propiedades especiales o específicas para fabricar el soporte estructural de la máquina, puesto que la operación del dispositivo se realiza bajo condiciones normales, además que no requiere soportar mayores cargas estáticas y se descarta la presencia de cargas fluctuantes.

Por las dimensiones y volumen general de la máquina, se considera y se sugiere que se mantenga estática, por lo que la portabilidad de la misma es un factor deseable mas no es altamente influyente, de esta manera, la selección del material estructural se realiza teniendo en cuenta otro tipo de factores como el precio, la disponibilidad, la ensamblabilidad o soldabilidad, la geometría, entre otros.

Las tuberías estructurales en acero o perfiles en geometrías redonda, cuadrada o rectangular, son una alternativa industrial, diseñada para construir sistemas estructurales metálicos de alta resistencia, de manera práctica, rápida y sencilla. A pesar que ambas geometrías (redonda y cuadrada) cuentan con características similares, el factor diferenciador entre ambas – al menos para esta aplicación-, radica en que la tubería cuadrada es más sencilla de soldar al construir un marco, puesto que sus caras planas permiten realizar empalmes y soldaduras de una forma más cómoda y sencilla.

Fabricada con acero laminado en caliente (HR) según la norma ASTM 500 G.C⁸, de bajo contenido de carbono, alta soldabilidad y ductilidad. La tubería estructural cuadrada en Acero tiene una gran variedad de usos, desde obras civiles, trabajos con energía y telecomunicaciones, arquitectura, transporte y hasta la fabricación de maquinaria. Se utilizan también en estructuras cubiertas, cerchas, galpones, construcción de carrocerías para buses, entre muchos otros.

Comercialmente se encuentra una gran variedad de tuberías estructural cuadrada en Acero, con calibres que van desde 1.5mm hasta los 6.35mm, con aristas desde 22mm hasta las más grandes de 150mm, dependiendo del proveedor.

Las especificaciones correspondientes al material con que se construyó el cuerpo estructural de la máquina, es suministrada por el proveedor y se encuentra descrita de la siguiente manera:

Tabla 14. Características de la perfilería seleccionada

CARACTERÍSTICAS Y DENOMINACIÓN						PROPIEDADES ESTÁTICAS								UNIDADES DE EMPAQUE
TAMAÑO PERFIL				Espesor pared e mm	PESO Negro K2/Ln Galvanizado K2/Ln		ÁREA cm ²	FLEXIÓN			TORSIÓN			
TAMAÑO NOMINAL		REAL						Momento Inercia Ix = Iy cm ⁴	Módulo elástico Sx = Sy cm ³	Radio de Giro rx = ry cm	Módulo Plástico Zx = Zy cm ³	Momento Inercia J cm ⁴	Módulo Elástico θ cm ³	
PULGADAS	MILIMETROS	d mm	b mm											
4 X 4	100 X 100	100.00	100.00	2.00	6.07	-	7.74	173.03	24.60	3.99	28.30	190.75	36.94	
		100.00	100.00	2.50	7.53	-	8.59	150.63	30.13	3.96	34.86	235.64	45.77	
		100.00	100.00	3.00	8.96	-	11.41	177.05	35.41	3.94	41.71	279.48	53.77	
		100.00	100.00	4.00	11.79	-	14.95	226.35	45.27	3.89	53.30	364.04	68.31	
		100.00	100.00	5.00	14.97	-	18.36	273.50	54.22	3.84	64.59	444.62	82.14	
		100.00	100.00	6.00	17.88	-	21.63	311.47	62.29	3.79	76.50	521.39	94.85	

Fuente: Soluciones Tubulares

5.2.1.4 Construcción del cuerpo estructural del dispositivo

A partir de tubería en acero estructural seleccionado para esta aplicación (Ver Tabla 14), se realizan los cortes necesarios para obtener cada una de las secciones que se utilizarán en la construcción del marco o soporte estructural principal de la máquina.

⁸ Información suministrada vía telefónica por el personal de Soluciones Tubulares S.A.S

Figura 40. Despiece marco principal - Construcción

GEOMETRIA	CANTIDAD
	4
	2
	2
	4



Fuente: Autor

Sobre el marco principal presentado en la **Figura 39**, se soportan todas las demás piezas que componen la máquina, por lo que se fabrica de tal manera que se mantenga como una estructura sumamente robusta y estable. Las soldaduras del marco se realizaron con soldadura MIG.

La construcción del cuerpo estructural de la máquina, tomó cerca de 12 horas hombre, durante las cuales un equipo consolidado por dos personas se encargó de cortar, pulir, armar y soldar lo correspondiente al marco o soporte estructural de la máquina.

Figura 41. Evolución en la construcción del marco estructural



Fuente: Autor

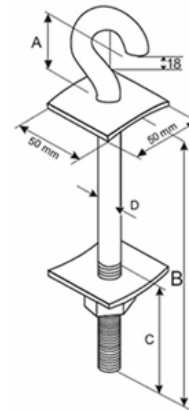
Mecanismo para colocar las cargas en el dispositivo

El gancho metálico es un elemento comercialmente abundante y con precios bastante razonables, se presenta como la alternativa perfecta para la sujeción de carga en la aplicación en curso.

Luego de una validación teórica del diseño en donde se considera la masa del brazo acorde al material en que se fabricó, se concluye que el diseño es funcional siempre y cuando la masa o carga sea de 5.25kg para garantizar los 130N, y de 1.8kg para alcanzar los 45N que exige la norma. Dicha masa será soportada por un gancho – perno o gancho metálico sujeto al brazo.

Tabla 15 gancho metálico roscado

CODIGO	DIMENSIONES (mm.)				CARGA MINIMA DE TRACCION	PESO Kg.
	A	B	C	D		
CA0101	50	100	178	16	12 kN	0.670
CA0102	50	100	203	16	12 kN	0.700
CA0103	50	100	228	16	12 kN	0.730
CA0104	50	100	254	16	12 kN	0.750
CA0105	50	100	305	16	12 kN	0.900
CA0106	50	100	356	16	12 kN	0.950
CA0107	50	100	406	16	12 kN	1.086



Fuente: REMAFLEX SAS ⁹

Evaluar la presentación cosmética

Frente a la presentación final de la máquina, uno de los principales factores a tener en cuenta fue la posibilidad de visualizar el ensayo desde una distancia prudente y segura por parte de los usuarios. Para ello, el dispositivo cuenta con compuertas frontales en acrílico transparente de 5mm de espesor, suficientemente resistente para cumplir su función como compuerta principal y simultáneamente permite una visualización completa del interior del dispositivo y del desarrollo de los ensayos.

Complementariamente, la máquina fue dotada de elementos de seguridad industrial para garantizar una operación segura por parte de sus usuarios.

⁹ Disponible en Línea: <http://www.remaflex.com.pe/portal/ferreteria-electrica/cables-autoportantes/gancho-de-suspension>

Figura 42. Máquina USTA para ensayos de abrasión en seco



Fuente: Autor

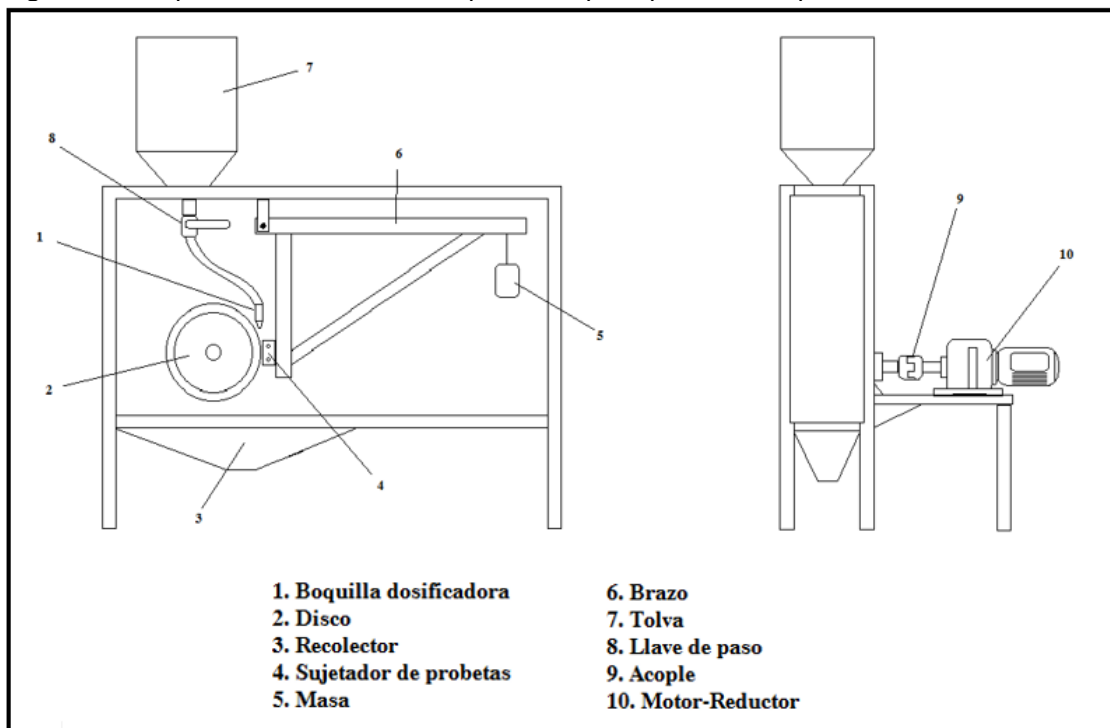
Otro de los factores importantes implícitos en la presentación general de la máquina, es la capacidad de perdurar en el tiempo a pesar del entorno de alojamiento en que permanezca la máquina. Esto se traduce en humedad, polvo, partículas y demás agentes ambientales presentes en un entorno educativo como lo son los laboratorios de una Universidad. Para ello, la carcasa, estructura y mayoría de piezas de la máquina fueron cubiertas con Pintura de Poliuretano. Pintura que ofrece una variedad de propiedades ideales para el proyecto en curso (impermeabilidad al agua y resistencia a agentes químicos principalmente), además de un acabado brillante y visualmente atractivo.

6 GENERALIDADES DEL DISPOSITIVO

6.1 Descripción general

A continuación, se presenta una breve descripción de los principales componentes del dispositivo. *Para consultar mayor información sobre los componentes del dispositivo, remitirse al anexo 3.*

Figura 43. Esquema básico de los componentes principales del dispositivo



Fuente: Autor

6.2 Parámetros para la certificación del dispositivo.

Para la certificación inicial del dispositivo, la norma describe que es necesario realizar al menos 5 pruebas sobre materiales referenciados (*Ver Tabla 16*), obteniendo resultados afines con los obtenidos en el Análisis Estadístico de Resultados entre Laboratorios (*Ver Tabla 17*) o alcanzando resultados dentro de los parámetros del Rango de Pérdida de Volumen (*Ver Tabla 18*).

Tabla 16 Materiales certificados/referentes

Material	Procedimiento	Dureza (HRC)	Pérdida de Volumen <i>mm</i> ³
AISI D2	A	59 - 60	36±5
AISI H13	B	47- 48	56±4
AISI 4340	B	31 - 33	49±3
	E		91±3

Fuente: ASTM G65

Tabla 17 Análisis Estadístico de Resultados entre Laboratorios

Round-Robin Test Conditions	Specified Procedure	Number of Samples	Average, <i>mm</i> ³	Standard Deviation Within, <i>mm</i> ³	Standard Deviation Between, <i>mm</i> ³	Coefficient of Variation Within, %	Coefficient of Variation Between, %	Coefficient of Variation Total, %	Standard Deviation Total, <i>mm</i> ³
RR No. 15 4340 steel	E	3	51.63	1.67	0.75	3.2	1.5	3.5	1.83
RR No. 14A and 14B 4340 steel	E	3	47.74	1.84	2.46	3.9	5.2	6.04	3.07
RR No. 14A and 14B 4340 steel	B	3	91.08	2.18	4.98	2.4	3.5	6	5.44
RR No. 12 WC-14 weight % CO 0.010 in. thick	A	4	2.18	0.14	0.42	6.4	19.3	20.4	0.44
RR No. 14 hard-chrome plating 0.010 in. thick	C	3	1.33	0.1	0.25	7.4	19.1	20.5	0.27

Fuente: ASTM G-65

Tabla 18 Rango de Pérdida de Volumen

	Standard Values (Mean ± Standard Deviation) ^A				
	Practice A, <i>mm</i> ³	Practice B, <i>mm</i> ³	Practice C, <i>mm</i> ³	Practice D, <i>mm</i> ³	Practice E, <i>mm</i> ³
AISI Tool Steel D-2 Reference Material No. 1 ^B	35.6 ± 5.2	...	...	...	...
AISI Tool Steel H-13 Reference Material No. 2 ^B	...	55.6 ± 4.2	...	...	...
AISI 4340 Steel Reference Material No. 3 ^B	...	...	...	91.1 ± 5.4	49.2 ± 2.9
	Nonstandard Values				
	Practice A, <i>mm</i> ³	Practice B, <i>mm</i> ³	Practice C, <i>mm</i> ³	Practice D, <i>mm</i> ³	Practice E, <i>mm</i> ³
316 stainless bar annealed RB-80	260 ± 20	...	...	58.5 ± 26.6	...
AISI 1090 plate-normalized 900°C (1600°F) air-cooled 24-26 HRc	80.7 ± 8.0	...	...	33.0 ± 6.0	...
17-4PH stainless-aged 500°C (925°F)-4 h at temperature, air-cooled-43 HRc	220 ± 20	122.1 ± 15.3	...	70.9 ± 6.1	...
Stellite 1016 hard surfacing overlay 57-58 HRc applied by oxyacetylene welding process (35 flame)	17 ± 4	...	...	...	...
Sintered tungsten carbide (Kennametal K-714, Valenite 2889)	1.9 ± 0.3	...	...	...	...
WC-Co flame spray coatings	2.2 ± 0.4	...	...	...	...
Hard-chrome plating	...	...	1.3 ± 0.3	...	...

Fuente: ASTM G-65

Una vez el equipo se encuentre certificado conforme con los resultados obtenidos y analizados estadística o volumétricamente sobre las 3 muestras, se recomienda repetir el procedimiento de calibración cada 3 meses para equipos que permanecen en desuso o recalibrar el equipo cuando se realicen más de 30 pruebas durante un período de tiempo inferior a 3 meses.

6.3 Calibración inicial del dispositivo

Para garantizar que la construcción del dispositivo cumple con los lineamientos de la norma ASTM G65, se realizaron 5 pruebas atendiendo a los parámetros

establecidos en el procedimiento B, donde se implementaron probetas en material AISI 4340.

Tabla 19 Modalidades de ensayo según la norma

Specified Procedure	Force Against Specimen, ^a N (lb)	Wheel Revolutions	Lineal Abrasion ^a m (ft)
A	130 (30)	6000	4309 (14 138)
B	130 (30)	2000	1436 (4 711)
C	130 (30)	100	71.8 (236)
D	45 (10.1)	6000	4309 (14 138)
E	130 (30)	1000	718 (2 360)

^a See 8.4.

N = Newton (SI metric term for force)

1 lbf = 4.44822 N

1 Kgf = 9.806650 N

^a Force tolerance is $\pm 3\%$.

Fuente: ASTM G65

Tabla 20. Tiempo de prueba según procedimiento

Procedimiento Especificado	Tiempo de Prueba (min)
A	30
B	10
C	0.5
D	30
E	5

Fuente: Autor

El procedimiento sugerido y efectuado para realizar las pruebas de desgaste abrasivo y el cual se utilizó para la calibración del dispositivo se describe de la siguiente manera:

1. Probetas

Para la calibración inicial del dispositivo, se utilizaron 5 probetas, las cuales contaban con dimensiones sugeridas por la norma (*Ver Figura 31*). El material de las probetas fue AISI 4340, el cual se encuentra estipulado como uno de los materiales admisibles para la calibración del equipo (*Ver Tabla 17*).

2. Verificar la idoneidad del material abrasivo

Humedad, tamaño y flujo de material abrasivo:

El material utilizado fue suministrado por la compañía SILICOL Sílices de Colombia, quienes proveen al mercado con una amplia variedad de arenas de sílice y quienes cuentan con el tamiz 50/70 que requiere la norma.

Por otra parte, la humedad del abrasivo se verificó de la siguiente manera: se someten 100gr de material abrasivo a 100°C durante 1 hora. Se realizó este procedimiento 10 veces con los siguientes resultados:

Tabla 21 Humedad del abrasivo

Prueba	% de humedad
1	0,23
2	0,27
3	0,25
4	0,27
5	0,26
6	0,21
7	0,22
8	0,21
9	0,22
10	0,22
Promedio	0,236

Fuente: Autor

La humedad obtenida en las diferentes muestras se encuentra dentro de los parámetros requeridos por la ASTM G65 donde requiere que sea inferior o igual a 0.5%.

3. Verificar las condiciones del disco de abrasión

La medición del diámetro exterior del disco abrasivo se realiza con un flexómetro, corroborando la dimensión requerida por la norma que es de 9" (*Ver Figura 22*), de igual manera se verifica el espesor del recubrimiento en caucho.

La dureza del recubrimiento en caucho, es validada a través de la ficha técnica del componente suministrado por el proveedor (*Ver Tabla 8*).

Cabe aclarar que, al realizar estos procedimientos, todos los componentes de la máquina son nuevos.

4. Verificar la carga sobre las probetas

Para verificar que la carga sobre las probetas corresponda con lo requerido por la norma conforme con el procedimiento seleccionado, fue necesario realizar un montaje sobre el dispositivo que permitiera la lectura en tiempo real de la fuerza con la que el brazo incidía sobre la probeta para generar la fricción con el disco:

Figura 44. Montaje del dinamómetro



Fuente: Autor

De acuerdo con el montaje del dinamómetro expuesto en la Figura 44, se procede a colocar el contrapeso indicado y validar que la probeta reciba la fuerza requerida para el procedimiento. Posterior a la verificación, se debe desmontar el dinamómetro del dispositivo.

5. Garantizar caudal requerido y flujo laminar

Respecto al flujo de material, en primer lugar, se garantizó el suministro del mismo de manera lineal a través de la boquilla dosificadora. Para ello fue necesario limar suavemente la parte interna de la boquilla para corregir las imperfecciones superficiales presentes en la boquilla, de esta manera se logró un flujo laminar constante de material abrasivo.

Figura 45. Flujo laminar constante



Fuente: Autor

Conforme con los requerimientos de la norma, el caudal de material abrasivo debe estar entre 300 y 400 grs/min. Para garantizarlo, se permitió el flujo de material

abrasivo a través de la boquilla durante un minuto para posteriormente pesar la cantidad total de material obtenido. El anterior procedimiento se llevó a cabo durante 15 repeticiones en igualdad de condiciones obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 22 Flujo de arena en la boquilla fabricada

Prueba	Flujo de Arena g/min
1	303,6
2	302,3
3	302,5
4	305,7
5	302,6
6	304,1
7	303,8
8	304,7
9	302,4
10	303,4
11	302,6
12	304,2
13	305,4
14	304,3
15	303,7
PROMEDIO	303,69

El caudal promedio obtenido durante las pruebas corresponde a los parámetros sugeridos por la norma ASTM G65, concluyendo que este ítem se encuentra apto para realizar los ensayos correspondientes.

6. Limpieza de las probetas

Se realizó de manera ordinaria frotándolas con un trapo húmedo y dejando secar en frío.

Figura 46. Probeta limpia y lista para la prueba



Fuente: Autor

Para probetas que se encuentren medianamente engrasadas, se sugiere el uso de algún disolvente o desengrasante.

7. Pesar probetas

El procedimiento se realiza implementando una gramera digital con una precisión de 0.0001grs. Los resultados obtenidos fueron:

Tabla 23. Peso inicial de las probetas

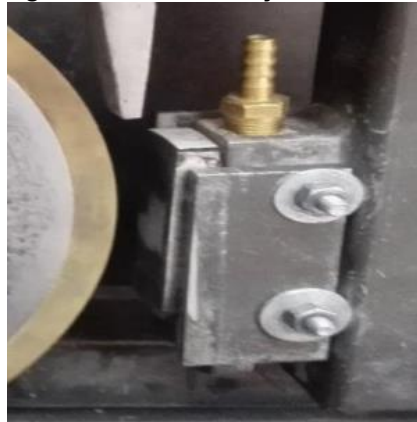
Probeta	Peso inicial (grs)
1	190.5931
2	195.1244
3	191.2338
4	192.0543
5	192.8541

Fuente: Autor

8. Colocar probeta sobre el dispositivo y asegurarla

La probeta se coloca sobre el porta-probetas, el cual cuenta con apoyo vertical que impide que la probeta se deslice verticalmente hacia abajo. La probeta se asegura a través de dos platinas laterales ajustadas a través de pernos.

Figura 47 Probeta sujeta en su lugar



Fuente: Autor

9. Abrir el suministro de material abrasivo

Accionando la llave de paso ubicada en la parte interna del dispositivo, se permite o se restringe el paso de material abrasivo que previamente se encuentra calibrado.

10. Encender el dispositivo

Se acciona el mecanismo de encendido al pulsar el botón de color verde sobre el control de encendido.

Dado que el dispositivo se construyó con la implementación de un motor reductor de engranajes que a través de un eje sólido transfiere directamente la potencia y velocidad angular hacia el disco de abrasión, la verificación de la velocidad angular del disco se puede corroborar con la ficha técnica del motor reductor (Ver *Tabla 13*), donde se especifica la velocidad angular de salida en 193.9rpm, la cual se encuentra dentro del rango admisible por la norma que es de 200 (+o – 10rpm).

Por otra parte, se validó la velocidad angular en tiempo real al implementar un tacómetro laser, el cual realizó la lectura correspondiente sobre el acople flexible en la parte trasera del dispositivo, corroborando la velocidad angular requerida

11. Colocar el contrapeso adecuado sobre el gancho de sujeción

Se coloca manualmente el contrapeso sobre el gancho de sujeción (5.25Kg), se procede a someter la probeta a fricción suavemente y se da inicio al conteo de tiempo para la prueba.

Finalizado el punto 8, se da inicio a la prueba, por lo que el tiempo se debe tomar desde el momento en que la probeta entra en contacto con el disco de abrasión.

A pesar que la norma suministra el tiempo de duración de la prueba en el numeral 8 (Ver *Tabla 25*), se realizó la validación teórica a partir la distancia de abrasión lineal a la que se somete la probeta y la velocidad angular del disco de abrasión, se calculó el tiempo estimado de prueba teniendo en cuenta el perímetro del disco de abrasión y las RPM a las que gira el mismo durante la prueba.

Tabla 24. Parámetros procedimiento tipo B

Fuerza ejercida en la probeta (N)	RPM disco abrasivo	Abrasión lineal (m)	Tiempo de prueba (min)
130	193.9	718	10

Fuente: Autor

Como la norma indica que el disco de abrasión debe tener un diámetro exterior de 9" (0.2286m), calculamos el perímetro del disco abrasivo de la siguiente manera:

$$\rho = \pi d \quad (1)$$

Donde:

ρ = perímetro

d = diámetro

$\pi = 3.1592$

Por lo anterior tenemos que para el perímetro del disco de abrasión:

$$\rho_{disco} = \pi(0.2286m) = 0.722m \quad (2)$$

Ahora, conociendo el valor del perímetro del disco de abrasión y de las RPM a las que gira el disco (Ver figura 42), calculamos la velocidad de abrasión del disco:

Velocidad de abrasión en el disco:

$$V_{abrasión} = RPM * \rho_{disco} \quad (3)$$

Donde:

$$rpm = 193.9$$

$$\rho_{disco} = 0.722m$$

Por lo tanto:

$$V_{abrasión} = 140.03 \frac{m}{min} \quad (4)$$

Al conocer la abrasión lineal que realiza el disco por minuto y conociendo la abrasión lineal total que debe realizar de acuerdo con el procedimiento de prueba E, se calculó el tiempo de prueba de la siguiente manera:

$$X_{abrasión\ total} = V_{abrasión} * t_{prueba} \quad (5)$$

Donde:

$$X_{abrasión\ total} = 718m$$

$$V_{abrasión} = 140.03 \frac{m}{min}$$

Despejando el tiempo en la ecuación 5 y reemplazando los valores anteriormente registrados se tiene que:

$$t_{prueba} = 5.127min \quad (6)$$

Por lo anterior, se tiene que el tiempo de prueba para realizar el procedimiento E descrito por la norma y teniendo en cuenta las características del dispositivo del proyecto en curso, es de aproximadamente **5 minutos**.

Terminado el tiempo de prueba, se continuó con el procedimiento de la siguiente manera:

12. Apagar el dispositivo

Accionando el pulsador de color rojo en el control de encendido, se apaga el dispositivo.

13. Interrumpir el flujo de material abrasivo

Accionar la llave de paso ubicada en la parte interna del dispositivo, de tal manera que se interrumpa el flujo de material abrasivo

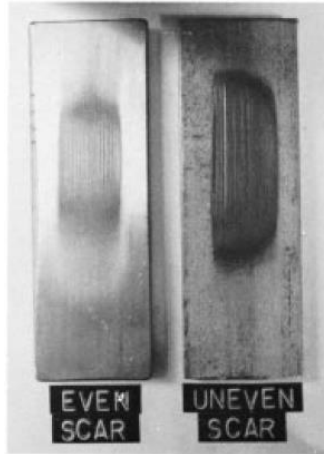
14. Desmontar la probeta

Liberando los pernos de sujeción lateral de la probeta y retirando el contrapeso del brazo, se accede fácilmente a la probeta y se retira del dispositivo. *Es indispensable el uso de elementos de protección personal sobre las manos mientras se realiza el desmonte, puesto que al finalizar la prueba la probeta presentará alta temperatura.*

15. Verificar uniformidad de la huella

Verificar la huella de desgaste obtenida. Validar que la misma sea uniforme a lo largo y ancho de su extensión. Un patrón NO uniforme indica una alineación incorrecta de la probeta con el disco de abrasión o una probeta irregular, en cualquiera de los casos sería un factor que altera la precisión del resultado.

Figura 48. Ejemplo de huella uniforme y huella no uniforme



Fuente: ASTM G65

Figura 49. Una de las probetas ensayadas



Fuente: Autor

La figura 46 ilustra que la huella obtenida durante el ensayo con el dispositivo USTA es uniforme y constante a lo largo de toda su extensión, por lo que se consideró como un ensayo exitoso.

16. Pesar nuevamente la probeta y realizar el análisis respectivo

Para la certificación inicial del equipo, se procedió con 5 pruebas donde se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 25. Peso de probetas después de la prueba

Probeta	Peso inicial (grs)	Peso final (grs)
1	190.5931	190.1937
2	195.1244	194.7329
3	191.2338	190.8421
4	192.0543	191.6511
5	192.5210	192.4541

Fuente: Autor

Se procedió a realizar el análisis de pérdida de volumen conforme lo requiere la norma:

$$V_{perdido} = \frac{masa_{perdida} (grs)}{densidad \left(\frac{grs}{cm^3} \right)} \times 1000 \quad (7)$$

Teniendo en cuenta la información registrada en la Tabla 26 y consultando la densidad del acero AISI4340 ($\rho = 7.85 \frac{grs}{cm^3}$) para complementar la Ecuación 7, se obtuvo:

Tabla 26. Registro de datos obtenidos

Probeta	Peso inicial (grs)	Peso final (grs)	Pérdida de masa (grs)	Pérdida de Volumen (mm3)
1	190.5931	190.1937	0.3993	50.8734
2	195.1244	194.7329	0.3915	49.8751
3	191.2338	190.8421	0.3917	49.9001
4	192.0543	191.6511	0.4032	51.3641
5	192.5210	192.4541	0.4000	50.9564

Fuente: Autor

Conforme con los registros de la Tabla 27, la pérdida de volumen se encuentra dentro de los rangos admisibles descritos por la norma ASTM G65 (Ver tabla 18).

Para comprobar la precisión y la exactitud de los datos arrojados por el equipo, se utilizan métodos estadísticos, donde a partir del volumen perdido se calcula el promedio y la desviación estándar, para ello se utiliza la ecuación 8 y posteriormente se determina el coeficiente de variación con base en la ecuación 9.

$$\sigma = \sqrt{\frac{(\bar{x} - x)^2}{n - 1}} \quad (8)$$

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} * 100 \quad (9)$$

Donde:

σ = Desviación estándar

$\bar{x}$ = Media aritmética del volumen perdido en mm^3

x = Volumen perdido en mm^3

n = Número de ensayos

C_v = Coeficiente de variación

Conforme con lo anterior, se construye una tabla resumen donde se exponen los resultados de las pruebas.

Tabla 27. Análisis de datos

Probeta	Peso inicial (grs)	Peso final (grs)	Pérdida de masa (grs)	Pérdida de Volumen (mm3)	Media volumen perdido	Desviación Estándar	Coeficiente de variación (%)
1	190.5931	190.1937	0.3993	50.8734	50.5938	0.2825	0.56
2	195.1244	194.7329	0.3915	49.8751			
3	191.2338	190.8421	0.3917	49.9001			
4	192.0543	191.6511	0.4032	51.3641			
5	192.5210	192.4541	0.4000	50.9564			

Fuente: Autor

Conforme con lo anterior, también se corroboró que los resultados obtenidos con el dispositivo, se encuentran dentro de los parámetros estadísticos establecidos por la norma. (ver Tabla 17)

La información detallada sobre el procedimiento matemático se encuentra en el ANEXO 11.1

CONCLUSIONES

- El reconocimiento de las restricciones e identificación de los componentes que se encuentran definidos por la norma ASTM G65, restringen el desarrollo del presente proyecto hacia un proceso de construcción y puesta a punto de un dispositivo de ensayo que cumple con los requerimientos establecidos por la norma.
- Se efectuó la calibración de las variables influyentes, a saber: diámetro y dureza del recubrimiento de caucho, tamaño de grano, humedad y flujo del abrasivo, velocidad del motor y fuerza ejercida sobre la probeta. Permitiendo alcanzar los requerimientos y resultados exigidos por la norma ASTM G65.
- El desarrollo del presente proyecto permitió la construcción y puesta a punto de un dispositivo de ensayos debidamente calibrado y dispuesto para su implementación en el proceso formativo de los estudiantes de ingeniería de la USTA.
- Se presenta una descripción detallada de los pasos a seguir y las consideraciones necesarias para desarrollar una práctica de laboratorio exitosa conforme con los lineamientos de la norma.
- Se presenta un manual de usuario en que se especifican las principales partes de la máquina, se suministra información referente al mantenimiento de las piezas y se presentan algunas pautas importantes para verificar el correcto funcionamiento de la máquina.

RECOMENDACIONES

- Operar el dispositivo únicamente bajo supervisión del encargado de los laboratorios o el docente.
- Proceder conforme con lo estipulado en la práctica de laboratorio.
- Únicamente utilizar arena de sílice 50/70 para la ejecución de las prácticas de laboratorio.
- La superficie de la probeta que entra en contacto con el recubrimiento de caucho debe ser plana y pulida, ya que, si presenta gránulos, rayas o zanjas, éstos provocarán acanalamiento en la superficie del caucho, alterando los resultados del ensayo y deteriorando de manera prematura la rueda.
- Las muestras de acero que tienen magnetismo residual deben desmagnetizarse, si no es posible, no se deben utilizar
- Verificar periódicamente las dimensiones del recubrimiento de caucho del disco de abrasión, las cuales deben permanecer entre 9 y 8.5 pulgadas.
- Verificar periódicamente el estado general de la boquilla dosificadora, debe permanecer libre de obstrucciones, deterioro y óxido.
- Validar periódicamente la alineación del brazo respecto al disco de abrasión.
- Mantener el dispositivo aseado y libre de humedad.
- Para el traslado del equipo, es recomendable desmontar los componentes susceptibles a desalineación como el disco de abrasión y el brazo.
- Se necesitan al menos 3 personas para trasladar el dispositivo, para lo cual se sugiere retirar la tolva superior y el colector inferior.
- Realizar calibración del equipo cada 3 meses o 30 ensayos.
- Verificar el nivel y estado del lubricante del motor reductor cada 6 meses.
- Los pernos de sujeción del porta-probeta son sólo para mantener fija la probeta durante el ensayo, no exceder el torque de apriete.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Norma Técnica ASTM G-65/00. *Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*, American Society for Testing and Materials 2000.

[2] ECHAVARRÍA AMENGUAL. Juan R, GAMILO CARAM. Guillermo A, SOTO TRINIDAD. José L, VALLEJO MONTERO. Oscar O. Manufactura de una Máquina para Ensayos de Abrasión Seca & Húmeda. EN. *Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2013)*. (14-16 de Agosto: Cancun, México).

[3] UNITED TEST, “MLS-200, *friction and wear testing machine*”.
Internet: www.directindustry.es
<<http://www.directindustry.es/prod/beijing-united-test-co-ltd/maquinas-pruebas-friccion-desgaste-103733-1078071.html>>

[4] FALTEX, “*Dry Sand/Rubber wheel Aparatus*”.
Internet: www.faltex.com
<<http://www.falex.com/pdf/FalexDrySand.pdf>>

[5] MICROTEST S.A, “MT 4001-a 98, *Software de Control y Adquisición de Datos para Ensayos de Abrasión y Desgaste*”.
Internet: <http://www.microtest-sa.com>
<http://www.microtest-sa.com/descargas/mt4001_a_98.pdf>

[6] WAZAU, “APG SN 27650, *Abrasion Testing Device*”.
Internet: <http://www.wazau.com>
<<http://www.wazau.com/en/products/materialtesting/tribology/surface-testing/abrasion-testing-device-apg-sn-27650.html>>

[7] EXCEED CONSULTING, “*Dry Sand Abrasion Testing ASTM G65*”.
Internet: <http://www.exceedconsulting.com.au>
<http://www.exceedconsulting.com.au/inspections_testing.html>

[8] Universidad Distrital Francisco José de Caldas, “Máquina para ensayo de desgaste abrasivo según norma ASTM G65”.
Internet: www.vidgrids.com
<<http://vidgrids.com/astm-g65>>

[9] Scientia et Technica Año XV, No 41, Mayo de 2009. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701

[10] Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, “Laboratorio de Tribología y Superficies, Máquina rueda de caucho- abrasivo para el estudio del desgaste abrasivo a tres cuerpos (Norma ASTM G65)”. Internet: http://intranet.minas.medellin.unal.edu.co/<http://intranet.minas.medellin.unal.edu.co/index.php?option=com_content&view=article&id=1387&Itemid=421>

[11] DEL CASTILLO, Felipe D. *Laboratorio en Tecnología de Materiales, TRIBOLOGÍA: FRICCIÓN, DESGASTE Y LUBRICACIÓN*. Lecturas de Ingeniería 2. CAUTITLAN IZCALLI, 2007.

[12] RODRIGUEZ, Oscar F. CALIDAD SUPERFICIAL: Rugosidad, Máquinas, Métodos y Control Dimensional del Procesamiento. Escuela de Educación Técnica (EET), Santa Fé, Argentina. 2000.

[13] SECO, Diego F. Medición de Rugosidades. (En Línea) (Marzo de 2014) Disponible en: <https://es.slideshare.net/dmsf706/medicin-de-rugosidades>

[14] HINCAPIE CAMPOS, Williams Steve. Resistencia al desgaste abrasivo de recubrimientos comerciales Metaceram 25050 y Proxon 21071 producidos con el sistema de proyección térmica por llama. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Bogotá, Colombia. 2013.

[15] EXXON MOBILE CHEMMICAL. “Goma de Clorobutilo EXXON”. Internet: <http://www.exxonmobilchemical.com>
<<http://www.exxonmobilchemical.com/Chem-English/brands/butyl-rubber-exxon-chlorobutyl.aspx?ln=productsservices>>

[16][11] MISCHKE. Charles R, SHIGLEY. Joseph E. Diseño en ingeniería mecánica. Sexta Edición, Ciudad de México: MCGRAW HILL, 2004. 1258p.

[17][12] SEVILLANO, Fernando C. Variadores de Frecuencia. Sistemas de Regulación y Control Automáticos. (En Línea). (Febrero 14 de 2014), Disponible en {http://ingenieros.es/files/proyectos/Variadores_de_frecuencia.pdf}

[18][13] REGAL. Proveedor Industrial. TSLOTS Aluminio Estructural. {En línea}. {Abril 8 de 2014}. Disponible en {<http://www.regalmex.com/productos/aluminio-estructural/tslots/>}

[19] A.N.J. Stevenson I, I.M. Hutchings, Development of the dry sand/rubber wheel abrasion test, Wear 195, 1996 232-240.

[20] MARULANDA A., José, ZAPATA M. Alberto, ESTRADA, Carlos A. Construcción de una máquina para ensayo en desgaste abrasivo; según norma

técnica ASTM G-65. Scientia et Technica Año XV, No 41, Mayo de 2009. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701.

[21] Romero Gutiérrez, Hugo, Diseño y construcción de una máquina para pruebas de desgaste abrasivo, Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería, 1987.

[22] Enrique E. Niebles Núñez, Franz Quesada T., Henry Santamaria D., Daimer José Méndez Muñoz, Andrés Armando Ruiz Rodríguez, Metodología para el diseño y construcción de una máquina para medición del desgaste abrasivo basado en la norma astm g-65, Prospectiva Vol. 7, No. 1, Enero - Junio de 2009, p. 53-58.

[23] Hawk, J., Laboratory abrasive wear tests: investigation of test methods and alloy correlation. WEAR, 1999. 225-229: p. 1031-1042.

[24] McCartney, S.M.N.P.H.S.D.G., Particle motion and modes of wear in the dry sandrubber wheel abrasion test. WEAR, 2008. 267: p. 9.

[25] Trezona, R.I., D.N. Allsopp, and I.M. Hutchings, Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test. WEAR, 1999. 225–229, Part 1(0): p. 205-214 U.

[26] GONZALEZ H., Andrés Yovanni. Estudio de la influencia de las propiedades físicas y mecánicas en el comportamiento tribológico de recubrimientos duros para herramientas de corte y procesamiento de polietileno. Universidad de Antioquia. Medellín, 2008.

[27] LÓPEZ L., Edgar Jesús. Estudio experimental del desgaste abrasivo en acero AISI 8620, D-2 y H-13 con y sin tratamiento superficial. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería. México, junio de 2004.

[28] ZUM GAHR, Karl-Heinz. Microstructure and wear of materials, Elsevier. Holanda, 1987.

ANEXOS

ANEXO No. 1 Práctica de Laboratorio
PRÁCTICA DE LABORATORIO
ENSAYO DE DESGASTE ABRASIVO EN SECO
ASTM G 65

RESUMEN

La norma ASTM G65 describe una práctica de laboratorio que permite determinar la resistencia de los materiales metálicos a la degradación superficial por fricción mediante una prueba con abrasivo en seco y un disco de goma. El objetivo principal de este ensayo es el de generar datos estandarizados para clasificar los materiales por su resistencia a la abrasión en seco bajo un conjunto específico de condiciones.

Los resultados de la prueba de abrasión se reportan como pérdida de volumen en milímetros cúbicos.

Tabla 1. Parámetros y procedimientos de la Prueba

Specified Procedure	Force Against Specimen, [#] N (lb)	Wheel Revolutions	Lineal Abrasion [^] m	(ft)
A	130 (30)	6000	4309	(14 138)
B	130 (30)	2000	1436	(4 711)
C	130 (30)	100	71.8	(236)
D	45 (10.1)	6000	4309	(14 138)
E	130 (30)	1000	718	(2 360)

[^] See 8.4.

N = Newton (SI metric term for force)

1 lbf = 4.44822 N

1 Kgf = 9.806650 N

[#] Force tolerance is $\pm 3\%$.

El tiempo de la prueba será de aproximadamente 30 minutos para los Procedimientos A y D, 10 minutos para el Procedimiento B, 5 minutos para el Procedimiento E y 30 segundos para el Procedimiento C, dependiendo de la velocidad real de la rueda.

NOTA: Realizar la práctica de laboratorio bajo la supervisión del docente o del laboratorista.

Materiales

- Probeta rectangular de 25.4 x 76 x 12.7mm (1"x 3" x 0.5")
- Báscula digital (sensibilidad de 0.001g o 0.0001g para el Procedimiento C)
- Arena de sílice AFS 50/70
- Tacómetro
- Máquina de ensayo con su respectiva herramienta

Procedimiento

Una vez se determine el procedimiento a realizar, colocar el material abrasivo en la tolva y aliste el contrapeso específico. Diligencie el **TABLA DE DATOS** conforme avance el desarrollo de las siguientes indicaciones:

- 1) Garantizar el flujo laminar y constante de material abrasivo (*entre 300 y 400g/min*).
 - a) Permita el flujo de material abrasivo a través de la boquilla dosificadora.
 - b) Garantice que el flujo de material se realiza de manera lineal e ininterrumpida tal y como se muestra en la imagen 1.

Ilustración 1. Flujo laminar de material abrasivo



- c) Almacenar el material abrasivo que corre a través de la boquilla dosificadora durante 1 minuto
 - d) Utilice la báscula digital para verificar que el material almacenado durante 1 minuto pesa entre 300 y 400grs
- 2) Limpiar rigurosamente la probeta para garantizar la ausencia de grasa, impurezas o cualquier tipo de suciedad sobre la superficie. A continuación, se debe secar completamente la probeta. La superficie de contacto del disco también debe estar limpia. *(Es indispensable remover absolutamente todas las partículas sobre la superficie de la probeta y esperar a que esté completamente seca. Los residuos de limpiador también deben ser retirados)*
- 3) Utilizando la báscula digital, pese la probeta y registre la información. *(es importante registrar 3 cifras significativas y 4 para el procedimiento C).*

- 4) Monte la probeta en el sujeta-probetas y ajuste los pernos de sujeción.

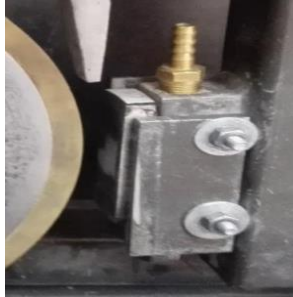


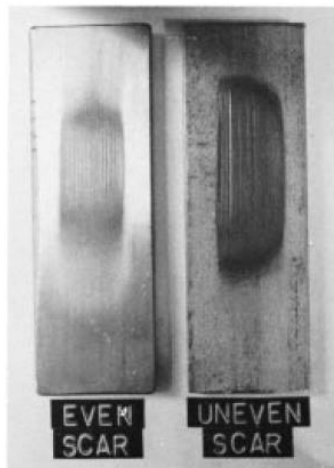
Ilustración 2. Probeta instalada y sujeta

- 5) Abra el suministro de material abrasivo y coloque el contrapeso indicado sobre el gancho de sujeción presente en el brazo, posteriormente cierre las compuertas del dispositivo. *(El dispositivo debe permanecer apagado mientras se realizan estos procedimientos)*
- 6) Encender el dispositivo pulsando el botón de color verde en el control de encendido y comenzar con el registro del tiempo de prueba. *Es importante verificar la velocidad de rotación del disco (200rpm, + o – 10rpm).*
- 7) Cuando la prueba alcance la abrasión lineal especificada *(tiempo de prueba cumplido o número de revoluciones totales finalizada)*, apague el dispositivo pulsando el botón de color rojo en el control, retire la carga de la probeta liberando el contrapeso del brazo y por último interrumpa el flujo de material abrasivo cerrando la llave de paso. *Es sumamente importante mantener el flujo de material abrasivo y la carga sobre las probetas durante todo el procedimiento. Si por algún motivo el ensayo se interrumpe, comience nuevamente la prueba desde el paso 1.*
- 8) Retire la probeta del dispositivo, límpiela, vuelva a pesarla y registre la información. *Nuevamente con un mínimo de 3 cifras significativas (0.001g) o 4 cifras significativas para el procedimiento C (0.0001g)*

ADVERTENCIA: Durante la prueba la probeta es sometida a fricción en seco, por lo que presentará una elevada temperatura al momento de retirarla. Utilice de elementos de protección personal en sus manos al momento de manipularla.

- 9) Compare la uniformidad de la huella con los ejemplos de la Ilustración 3. Si la huella en la probeta es uniforme, continúe a la actividad 10, de lo contrario verifique la alineación del dispositivo y de ser necesario, repita el ensayo.

Ilustración 3 Huella uniforme y huella no uniforme



Si la huella presente no es uniforme, el disco y el sujetador de probetas se encuentran desalineados, por lo que el resultado de la prueba pierde veracidad.

- 10)** Realizar el respectivo análisis de datos y presentar las conclusiones de la prueba. Los resultados del ensayo deben reportarse como la pérdida de masa en milímetros cúbicos de acuerdo con el procedimiento que se haya realizado, utilice la información adjunta para realizar los cálculos pertinentes.

Ilustración 4. Formato de registro de datos

Ensayo de Desgaste Abrasivo en Seco ASTM G65					
Integrante (s)				Fecha:	
Asignatura				Docente:	
Información de la Prueba					
Diámetro de la Rueda		Espesor del caucho		Dureza Caucho	
Material:		Tratamiento Térmico:		Dureza:	
Test N°	1	2	3	4	5
Carga de prueba (N)					
RPM prueba					
Caudal de abrasivo (grs/min)					
Masa Inicial (grs)					
Masa final (grs)					
Densidad (grs/cm3)					
Pérdida de masa (mm^3)					
Pérdida ajustada de volumen (mm^3)					
Observaciones:					

Información Complementaria

La pérdida de Volumen o VL (*Volume Loss*) por sus siglas en inglés, es la relación entre la pérdida de masa de la probeta, y la densidad de la misma. Se describe de la siguiente manera:

$$VL \text{ (mm}^3\text{)} = \frac{\text{pérdida_de_masa_}(g)}{\text{densidad_}(g/cm^3)} \times 1000 \quad (3)$$

Para comprobar la precisión y la exactitud de los datos arrojados por el equipo, se utilizan métodos estadísticos, donde a partir del volumen perdido se calcula el promedio y la desviación estándar, de acuerdo a la ecuación 4 y posteriormente se determina el coeficiente de variación con base en la ecuación 5.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(\bar{x} - x)^2}{n - 1}} \quad (4)$$

$$Cv = \frac{\sigma}{\bar{x}} * 100 \quad (5)$$

Donde;

C_v = Coeficiente de variación

σ = Desviación estándar

$\bar{x}$ = Media aritmética del volumen perdido en mm³

x = Volumen perdido en mm³

n = Número de ensayos

Aunque la precisión y exactitud de las pruebas depende de los parámetros de ensayo (flujo de arena, fuerza sobre la probeta, tamaño de las partículas, distancia de deslizamiento y humedad del abrasivo), el grado de concordancia con otros ensayos dependerá fuertemente de la homogeneidad del material y de la interacción del equipo. El coeficiente de variación de los resultados es uno de los datos más importantes de esta prueba ya que ayuda a identificar qué tan óptimos son los resultados obtenidos; este coeficiente debe ser máximo de 6% para el procedimiento B indicado en la norma ASTM G-65 [45], que será utilizado para el desarrollo de esta investigación.

Debido a la fricción presente entre el disco de abrasión y las probetas durante los procedimientos de prueba, se presenta un desgaste en el disco consecuente con el uso del dispositivo. Este desgaste se evidencia en la disminución del diámetro original del disco (228.6mm o 9”), alterando la veracidad de los resultados. Para contemplar esta reducción del diámetro, se presenta el siguiente Ajuste a la Pérdida de Volumen o AVL (*Adjusted Volume Loss*) por sus siglas en inglés:

$$AVL = VL \frac{228.6\text{mm}(9")}{\text{Diámetro}_{\text{final}}_{\text{del}}_{\text{disco}}} \quad (6)$$

Dry Sand/Rubber Wheel Test ASTM G-65 Procedure _____						
Qualification of Apparatus (11.4):						Date _____
Reference Materials _____						Quantity _____
Adjusted Volume Loss (avg) _____ mm ³ Coefficient of Variation _____						%
Test Data						
Material Description: _____						Wheel diameter: _____
Heat Treatment: _____						Wheel width: _____
Hardness: _____						Wheel hardness: _____
Surface Preparation _____						
Test No.						
Test load						
Wheel revolutions						
Sand flow, g/min						
Initial mass, g						
Final mass, g						
Mass loss, g						
Density, g/cm ³ ^A						
Volume loss, mm ³ (mass loss/density) × 1000						
Adjusted volume loss, mm ³						
Comments: _____						
Company Name _____ Tested by _____ Date _____						

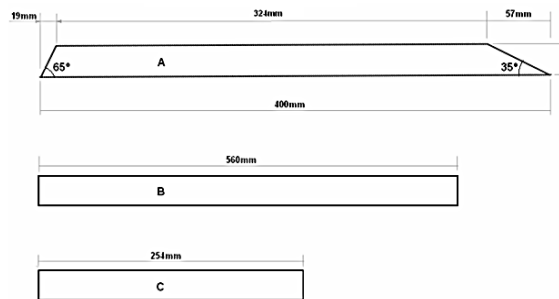
^A Density of materials may be obtained from ASM Metals Handbook, Vol 1, 8th ed. or suppliers of materials.

ANEXO No. 2 Memoria de Cálculos

MEMORIA DE CÁLCULOS

1. Validación del Brazo

La evaluación de la fuerza que ejerce el brazo sobre la probeta, se realiza en base a la siguiente información:



- Carga 1 = 130N
- Carga 2 = 45N
- La masa del material en que se fabricó, es de 6.07 Kg/m

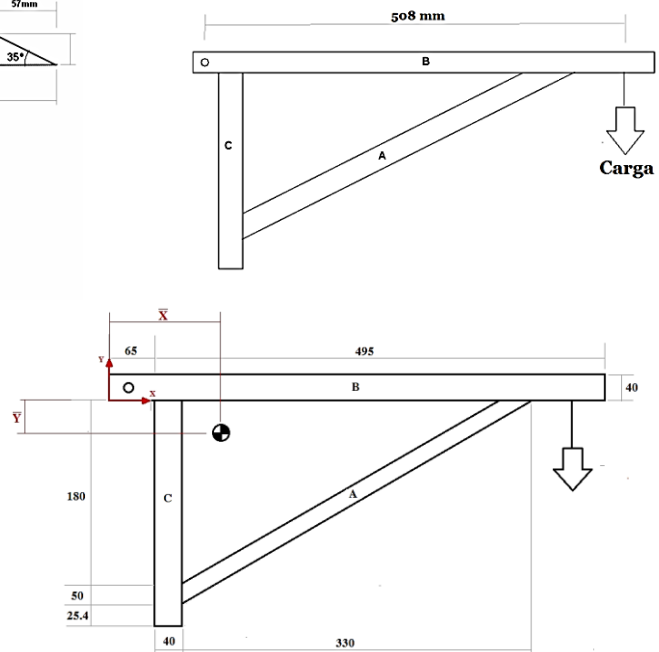


Figura	Área (mm ²)	Masa (Kg)	Centroide Individual (mm)	
			X	Y
A	15000	2,424	270	-110
B	20320	3,4	280	20
C	10160	1,54	85	-127

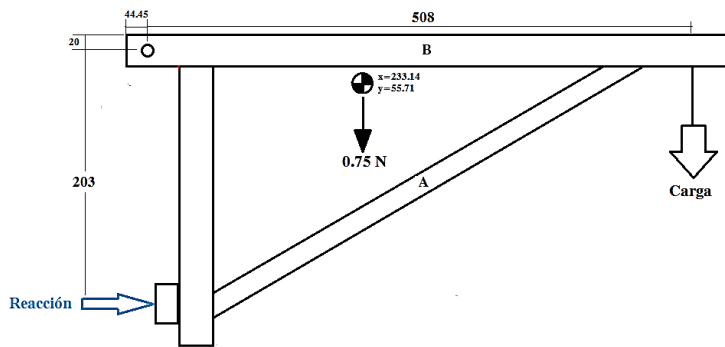
Masa Total = 7,36 Kg $\Rightarrow$ **0.75N**

Centroide Global (mm)	X	233,140
	Y	-55,715

Teniendo en cuenta que la distancia entre el origen del plano cartesiano y el punto de pivote es 44.45mm (1.75in) en X, y de 20mm (0.787in) en Y, se desarrolla el planteamiento estático y se concluye que:

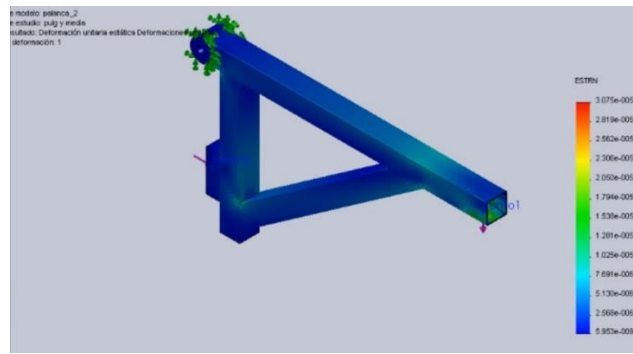
Para alcanzar 45N, la masa debe ser de 1.8kg.

Para alcanzar 130N en la probeta, la masa sujeta al brazo debe ser de 5.25kg



Complementariamente se realizó una comprobación utilizando herramientas CAD.

Ilustración 5. Validación del brazo en CAD



3. Validación del Eje

Para el análisis de esfuerzos a los que se encuentra sometido el eje en la operación en curso, se plantea un análisis estático en primera instancia, seguido de un análisis dinámico. Lo anterior para contrastar el desempeño del mismo componente frente a diferentes condiciones de funcionamiento.

Consideraciones para el Análisis:

Generalidades del ejercicio:

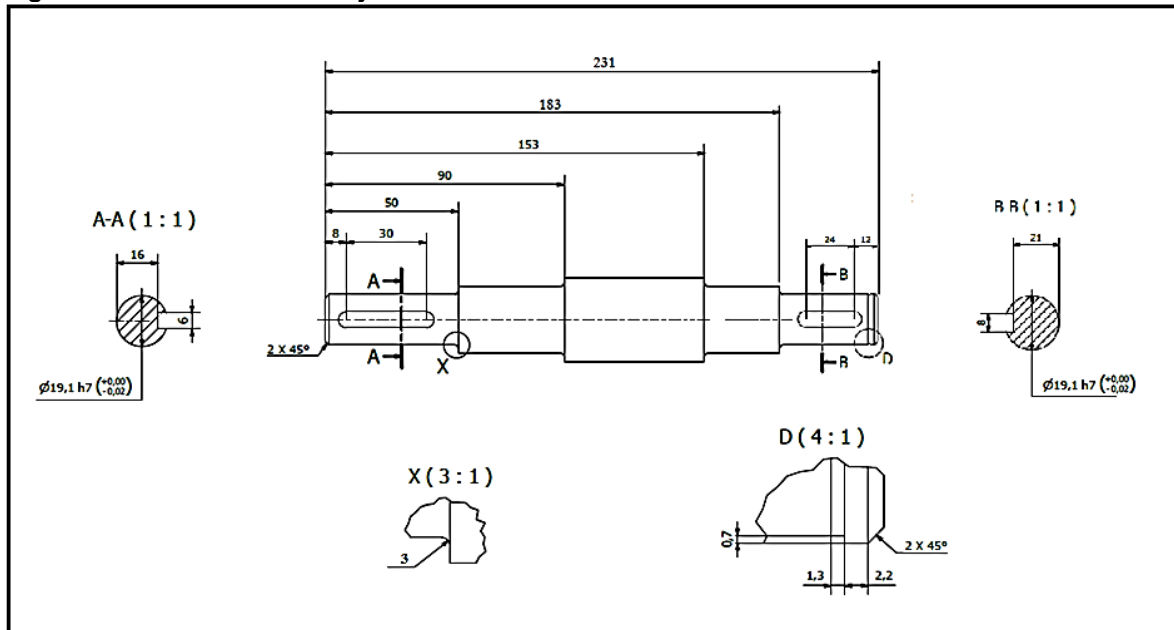
Material: Acero 8620 $\rightarrow S_{ut} = 101.5 \text{ ksi} \approx 700 \text{ MPa}$

Velocidad angular: 200rpm

Tiempo de Prueba = 30min $\frac{c}{u}$

r = 1.5mm

Figura 2. Dimensiones del Eje Final



Respecto a los diámetros: De izquierda a derecha encontramos lo que serían 5 secciones para el eje:

- La sección A, es de 19.1mm y es la sección por donde se transmite la potencia (1 HP) y el torque del motor-reductor (36.7Nm) al eje.
- La sección B es de 25.4 mm y es donde va la primera chumacera (de pared).
- La sección C es de 31.8mm (1.25 in) y es el hombro para los rodamientos.
- La sección D es el segundo apoyo a través de chumacera (de pedestal).
- La sección E es donde va acoplado el disco de abrasión y recibe la carga del ensayo (130N).

Para calcular el torque se emplea las ecuaciones del par motor, con potencia P en hp y velocidad angular en rpm, así:

$$T = \frac{63025 P}{\omega}$$

Remplazando los datos:

$$T = \frac{63025 (1\text{hp})}{190 \text{ rpm}}$$

$$T = 315,13 \text{ lb} \cdot \text{in}$$

Convirtiendo las unidades:

$$T = 315,13 \text{ lb} \cdot \text{in} \cdot \frac{0,113 \text{ N} \cdot \text{m}}{1 \text{ lb} \cdot \text{in}}$$

$$T = 37,48 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Con esto se podría determinar las fuerzas del acople, determinadas por el par torsor, teniendo en cuenta que tiene componentes en **y** y **z**:

$$T = F \cdot d$$

Reemplazando los datos conocidos de radio del acople, torque y asumiendo que la fuerza tangencial es equivalente en su descomposición:

$$A_y = \frac{37,48 \text{ N} \cdot \text{m}}{(0,03215 \text{ m})} \cdot \sin 45^\circ = 824,33 \text{ N}$$

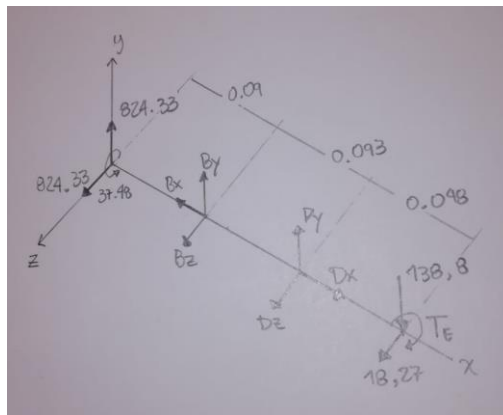
$$A_z = \frac{37,48 \text{ N} \cdot \text{m}}{(0,03215 \text{ m})} \cdot \cos 45^\circ = 824,33 \text{ N}$$

Por otro lado, en la salida del disco también se presenta una fuerza tangencial de 140 N con componentes en el eje **y** y **z**. Según la forma de la boquilla:

$$E_y = 140 \cdot \sin 7,5^\circ = 138,8 \text{ N}$$

$$E_z = 140 \cdot \cos 7,5^\circ = 138,27 \text{ N}$$

Posteriormente se realiza un diagrama de cuerpo libre del eje, se ubican las fuerzas y momentos.



Ahora, se procede a realizar la sumatoria de momentos alrededor del eje **y**.

$$\sum M_y: -B_z(0,09) - D_z(0,183) - 18,27(0,231) = 0$$

$$0.09B_z + 0.183D_z = -4.22$$

Luego, se realiza la sumatoria de las fuerzas en el eje z.

$$\sum F_z: 824.33 + B_z + D_z + 18.27 = 0$$

$$B_z + D_z = -842.6$$

Con el sistema de dos ecuaciones y dos incógnitas es posible despejar cada una de ellas, por lo cual:

$$\begin{vmatrix} 0.09 & 0.183 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} B_z \\ D_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -4.22 \\ -842.6 \end{vmatrix}$$

$$B_z = -1612.64\text{N}$$

$$D_z = 770.04\text{N}$$

Enseguida, se lleva a cabo la sumatoria de momentos alrededor del eje z.

$$\sum M_z: B_y(0.09) + D_y(0.183) - 138.8(0.231) = 0$$

$$0.09B_y + 0.183D_y = 32.06$$

Después, se realiza la sumatoria de las fuerzas en el eje y.

$$\sum F_y: 824.33 + B_y + D_y - 138.8 = 0$$

$$B_y + D_y = -685.5$$

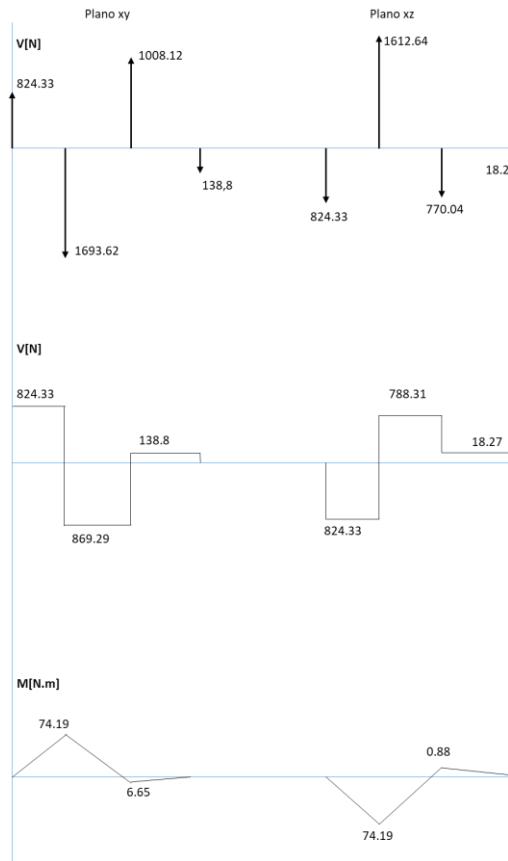
Con el sistema de dos ecuaciones y dos incógnitas es posible despejar cada una de ellas, por lo cual:

$$\begin{vmatrix} 0.09 & 0.183 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} B_y \\ D_y \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -4.22 \\ -824.33 \end{vmatrix}$$

$$B_y = -1693.62\text{N}$$

$$D_y = 1008.12\text{N}$$

Con las fuerzas halladas, se puede realizar el diagrama de fuerzas cortantes y momentos para realizar el diseño por resistencia:



Allí se observa que los momentos máximos son $M_y = 74.19 \text{ N} \cdot \text{m}$ y $M_z = 74.19 \text{ N} \cdot \text{m}$.

Tomando en cuenta el diagrama de cuerpo libre del eje y realizando la sumatoria de momento en eje x:

$$\sum M_x: 37,48 - M_E = 0$$

$$M_E = 37,48 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Este sería el momento torsor máximo recibido por el eje y se aplicaría en todo el eje.

Tomando como material acero 8620, con un límite de fluencia cortante de 380MPa, se asigna un factor de seguridad de 2 y se calcula el esfuerzo cortante admisible.

$$\tau_{\text{adm}} = \frac{\tau_m}{\eta}$$

$$\tau_{\text{adm}} = \frac{380 \text{ MPa}}{2} = 190 \text{ MPa}$$

De acuerdo a lo anterior y tomando la sección transversal crítica y al ser una sección circular sólida:

$$\frac{\pi c^3}{2} = \frac{\sqrt{M_y^2 + M_z^2 + T^2}}{\tau_{adm}}$$

$$c = \sqrt[3]{\frac{2\sqrt{74.19^2 + 74.19^2 + 37.48^2}}{\pi \cdot 190 \times 10^6}} = 0.00723m$$

Con lo cual se obtendría un diámetro de 14.46mm. Por lo tanto, si se usa un diámetro mayor sería funcional para soportar estas cargas.

En consecuencia, se debe observar el eje para ser diseñado a partir de criterios por carga estática.

Usando la teoría del esfuerzo cortante máximo (Tresca), se puede calcular un diámetro a partir de factor de seguridad (se propone de 2), límite de fluencia, flexión y torsión.

$$d^3 = \frac{32n_s}{\pi S_y} \sqrt{M^2 + T^2}$$

Reemplazando los datos conocidos:

$$d = \sqrt[3]{\frac{32n_s}{\pi S_y} \sqrt{M^2 + T^2}}$$

Para este caso la flexión máxima sería de:

$$M = \sqrt{M_y^2 + M_z^2} = \sqrt{74.19^2 + 74.19^2} = 104.92N \cdot m$$

Reemplazando los datos conocidos:

$$d = \sqrt[3]{\frac{32(2)}{\pi(380)} \sqrt{104.92^2 + 37.48^2}} = 13.02mm$$

Es conveniente también diseñar también bajo cargas cíclicas.

Primero se calculan los límites a la fatiga (S'_e) por bajo ciclaje para cada tipo de carga, con base en el esfuerzo último (S_u):

Para flexión: $S'_e = 0,9S_u = 0,9(400MPa) = 360MPa$

Para carga axial(tensión): $S'_e = 0,75S_u = 0,75(400MPa) = 300MPa$

Para torsión: $S'_e = 0,72S_u = 0,72(400MPa) = 288MPa$

Aclarado lo anterior, se procede con el cálculo del límite a la fatiga modificado:

$$S_e = K_a K_s K_r K_t K_m S'_e$$

Donde:

$$S_e = (K_{superficie})(K_{tamaño})(K_{confiabilidad})(K_{temperatura})(K_{carga})S'_e$$

$$K_a = 0.85 \rightarrow AS_{ut}^B \text{ (Maquinado)}$$

$$K_s = 0.848$$

$$\rightarrow 1.24d^{-0.107}$$

$$(2.79mm < d < 51mm)$$

$$K_r = 0.753 \rightarrow 99.9\%$$

(conservador)

$$K_t = 1 \rightarrow T < 450^\circ C$$

$$K_m = 1$$

$$K_m = 1 \rightarrow \text{Carga combinada}$$

Surface Finish	Factor a		Exponent b
	S_{ut} kpsi	S_{ut} MPa	
Ground	1.34	1.58	-0.085
Machined or cold-drawn	2.70	4.51	-0.265
Hot-rolled	14.4	57.7	-0.718
As-forged	39.9	272.	-0.995

Reliability, %	Transformation Variate z_σ	Reliability Factor k_σ
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

Adapted

from Budynas Niesbett, 8ed

$$S'_e = 360MPa$$

$$S_e = 195.4MPa \approx 28.34ksi$$

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}}$$

$$\sqrt{a} = 0.245799 - 0.307394 \times 10^{-2} S_{ut} + 0.150874 \times 10^{-4} S_{ut}^2 - 0.266978 \times 10^{-7} S_{ut}^3$$

$$\sqrt{a} = 0.0613$$

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{0.0613}}{\sqrt{0.059in}}} \rightarrow q = 0.4952$$

$$r/d = 0.118 \quad D/d = 1.248$$

$$k_{ts} \approx 1.3$$

$$k_t = 1 - q(k_{ts} - 1) \rightarrow 0.826$$

Ahora, utilizando un criterio algo conservador como lo es el de Goodman sobre la sección más crítica de nuestro eje, tenemos que:

$$d^3 = \frac{32N}{\pi} \left(\frac{(k_t Ma)}{S_e} + \frac{0.75(k_{ts} Ta)}{S_{ut}} \right)$$

Donde:

$N = 2$

$k_t = 0.826$

$Ma = 104.92 \text{ Nm}$

$k_{ts} = 1.3$

$Ta = 37.42 \text{ Nm}$

$S_e = 195.4 \text{ MPa}$

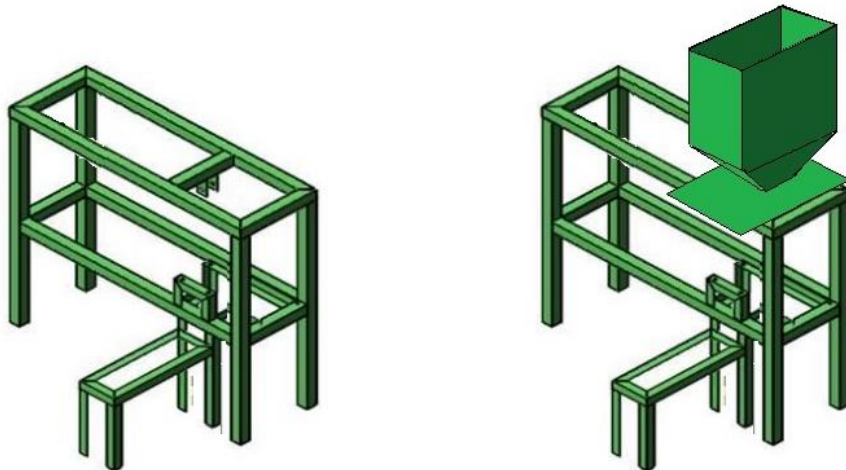
$S_{ut} = 400 \text{ MPa}$

$$d = 0.02216 \text{ m} \approx 22.16 \text{ mm}$$

Corroborando así que las dimensiones analizadas y en especial la sección más crítica del eje propuesto (sección $D=25.4\text{mm}$) se encuentra con un factor de seguridad más que superior a lo requerido, lo que garantiza su correcto dimensionamiento para la aplicación en curso.

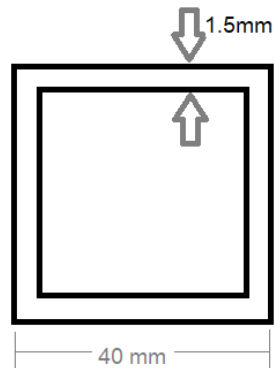
3. Validación estructural

El análisis estructural se realiza teniendo en cuenta que la tolva superior se encuentra con su mayor capacidad de almacenamiento, reposando cerca de 30Kg sobre la parte superior de la estructura.



Para realizar el análisis, es indispensable conocer las características y propiedades mecánicas del material que compone la estructura del dispositivo:

CARACTERÍSTICAS Y DENOMINACIÓN								PROPIEDADES ESTÁTICAS								UNIDADES DE EMPAQUE
TAMAÑO PERFIL				Espesor pared	PESO		ÁREA	FLEXIÓN				TORSIÓN				
TAMAÑO NOMINAL		REAL			e	Negro kg/m		Galvanizado kg/m	I _{xx} =I _{yy} cm ⁴	S _x =S _y cm ³	R _g =r _y cm	Módulo Plástico Z _x =Z _y cm ³	Momento Inercia J cm ⁴	Módulo Elástico I _x cm ⁴		
PULGADAS	MILIMETROS	d	b	a												
		mm	mm	mm												
4 X 4	100 X 100	100.00	100.00	2.00	6.07	—	7.74	123.01	24.60	3.99	28.30	190.75	36.94	9		
		100.00	100.00	2.50	7.53	—	8.59	150.63	30.13	3.96	34.86	235.64	45.27			
		100.00	100.00	3.00	8.96	—	11.41	177.06	35.41	3.94	41.21	279.48	53.27			
		100.00	100.00	4.00	11.78	—	14.95	226.35	45.27	3.89	53.30	364.04	68.81			
		100.00	100.00	5.00	14.97	—	18.36	273.30	54.22	3.86	64.59	446.62	82.14			
		100.00	100.00	6.00	17.88	—	21.63	313.47	62.29	3.79	75.10	521.89	94.85			



Conforme con lo anterior, se procede de la siguiente manera:

$$w = mg$$

$$w = (30kg)(9.81m/s^2)$$

$$w = 294.3N$$

Ahora, se procede con el cálculo de la carga crítica que puede soportar cada una de las columnas de la siguiente manera:

$$P_c = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

Donde;

P_c= Carga crítica (N)

E= Módulo de elasticidad (Pa)

I= Momento de inercia (m⁴)

L= Longitud sección (m)

$$I = \frac{1}{12} (c^4 - c^4)$$

$$I = \frac{1}{12} (0.04^4 - 0.0385^4)$$

$$I = 3.024 \times 10^{-8} m^4$$

$$P_c = \frac{\pi^2 (190 GPa) (3.024 \times 10^{-8} m^4)}{(1.2 m)^2}$$

$$P_c = 39.39 N$$

Ahora, considerando que la carga admisible (P_{adm}) se encuentra en función de la carga crítica P_c y del factor de seguridad $N=2$, tenemos que:

$$P_{adm} = \frac{P_c}{N}$$

$$P_{adm} = 4.695 kN$$

Dado que $P_{adm} \gg P_c$, se evidencia que el componente estructural se encuentra ampliamente sobredimensionado.

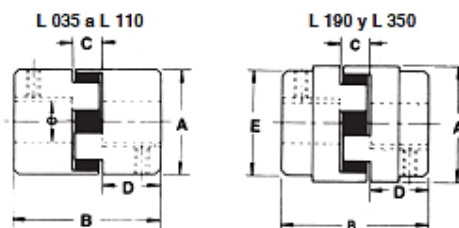
4. Selección del Acople

Para la selección de este tipo de acoples, es necesario considerar – principalmente- dos aspectos fundamentales: el torque que se desea transmitir y las dimensiones de los ejes a acoplar (el mayor de los dos).

Para el proyecto en curso, se exponen las siguientes consideraciones:

- El motor reductor implementado tiene una capacidad para transmitir un par de 37Nm aproximadamente (Información suministrada por el fabricante).
- Los ejes a acoplar tienen diámetros de 25mm (eje de salida en el motor reductor), y de 19.1mm (eje del dispositivo), respectivamente.

Ahora, comparando la información del dispositivo frente a la información expuesta en un catálogo comercial, encontramos que para una membrana en URETANO (por costo y accesibilidad en el mercado) los modelos desde el L090 en adelante son óptimos para la operación bajo las consideraciones expuestas, sin embargo. Para el proyecto en curso se instaló el equivalente a un L100, puesto que de esta manera se está estipulando un factor de seguridad considerable ($N=1.7$) que garantiza la operación del dispositivo sin inconveniente alguno.



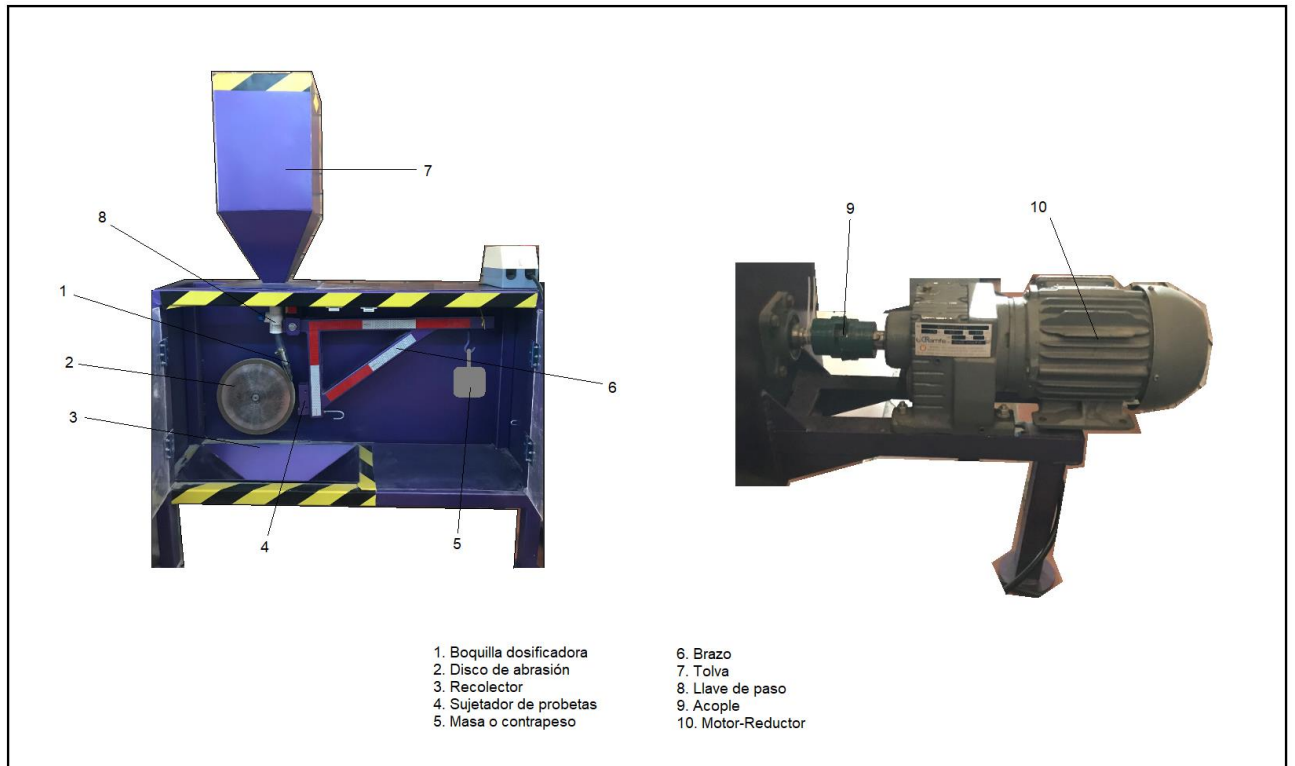
CARACTERÍSTICAS Y DIMENSIONES EN MM							PAR NOMINAL Nm		
							E + A	IN-SHEAR	H
Ref.	A	OD	B	D	E	Máx. agujero	NBR	URETANO	HYTREL
L. 035	15,9	-	20,6	6,7	15,9	10	0,40		-
L. 050	27,4	-	43,6	15,9	27,4	16	3		6
L. 070	34,5	-	50,8	19,1	34,5	19	5		13
L. 075	44,5	-	54,0	20,6	44,5	24	10		25
L. 090	53,6	65	54,0	20,6	53,6	25	16	38	45
L. 095	53,6	78	63,5	25,4	53,6	28	22	38	63
L. 100	64,3	78	89,0	34,9	64,3	35	47	63	127
L. 110	84,1	96	108,0	42,9	84,1	42	89	123	254
L. 150	95,3	111	114,3	44,4	95,3	48	139	205	415
L. 190	114,3	129	123,8	49,2	101,6	55	194	330	524
L. 225	127,0	142	136,5	55,6	108,0	65	262	406	697
L. 276	-	173	200	80	127	75	532	813 (E)	1330 (QF)
L. 295	-	253	238	95	162	95	1279	1956 (E)	3197 (QF)
L. 2955	-	253	264	108	180	105	2132	3261 (E)	5330 (QF)
L. 300	-	272	283	115	180	105	3047	4661 (E)	7617 (QF)
L. 350	-	323	309	128	200	115	4308	6591 (E)	10770 (QF)

Fuente: LoveJoy®¹⁰

¹⁰ Disponible en Línea: <http://www.lindis.com/pdf/Acoplamientos-ESP.pdf>

ANEXO No. 3 Manual de Operación
MANUAL DE OPERACIÓN

EQUIPO DE DESGASTE ABRASIVO EN SECO ASTM G65



I. CARACTERÍSTICAS ELECTRICAS

Tensión Nominal: 220V

Número de Fases: 3

Potencia necesaria: 2A

II. INSTALACIÓN DEL EQUIPO

1. Coloque el equipo sobre un lugar seco y que cuente con una superficie que se encuentre a nivel.
2. Conecte el dispositivo a un tomacorriente trifásico a 220V
3. Verifique que los componentes principales del dispositivo se encuentran correctamente instalados.

NOTA: Si se desea transportar el dispositivo de un lugar a otro, se sugiere que al menos 3 personas realicen el traslado. Adicional a ello, se sugiere la desinstalación del brazo y de la tolva durante el traslado.

III. COMPONENTES DEL EQUIPO

1. Boquilla Dosificadora:

imagen 1. Boquilla dosificadora instalada



Fabricada en acero SAE 8640, la boquilla dosificadora es una de las piezas de mayor importancia en el dispositivo debido a que es la encargada de suministrar la dosificación exacta de material abrasivo.

Se recomienda realizar una limpieza en el orificio de salida después de cada prueba para evitar que se obstruya.

2. Disco de abrasión:

imagen 2. Disco de abrasión instalado



El disco, es un conjunto entre los componentes interior y exterior: El disco interior metálico en acero (AISI 1020) de 203.2mm (8in) de diámetro y un espesor de 12.7mm (0.5in).

El “anillo” exterior, es un recubrimiento en caucho NBR 60 que encuentra adherido al disco A, tiene un diámetro exterior de 228.6mm (9in) y un espesor de 12.7mm (0.5in). Cuenta con una dureza A60 y es el encargado de generar el rozamiento sobre las probetas.

Recomendaciones:

- *Evitar el contacto con grasa, aceite, solventes y con agentes químicos agresivos.*
- *Para su limpieza se puede utilizar limpiador de vidrios o jabón para las manos.*
- *Puede soportar temperaturas de hasta 90°C, sin embargo, se recomienda mantener una temperatura de operación inferior a 60°C.*
- *Cambiar la cubierta de caucho (B) cuando el diámetro exterior se encuentre por debajo de 215.9mm (8.5in), o al evidenciar deterioro y/o porosidades en la cubierta exterior de caucho.*
- *Evitar los impactos de cualquier magnitud para prevenir des-alineaciones.*

3. Recolector de abrasivo remanente:

imagen 3. Recolector de abrasivo instalado



Es una unidad cónica encargada de recolectar el material abrasivo durante la prueba. Debe ser complementado con un recipiente para poder almacenar el material abrasivo.

Este componente se sostiene sobre la parte inferior de la estructura mas no se encuentra sujeto a ella.

4. Sujetador de Probetas:

imagen 4. Sujetador de probetas instalado



El sujetador de probetas es un conjunto de cinco piezas: Dos platinas, un núcleo y dos pernos con sus respectivas tuercas.

La probeta debe colocarse sobre el núcleo descansando verticalmente sobre la parte inferior del mismo, mientras que las platinas la sostienen lateralmente al ser ajustadas mediante los pernos de sujeción.

El torque aplicado a los pernos debe ser suave, sin embargo, debe ser suficiente para mantener las probetas en su posición.

5. Masa o contrapeso:

imagen 5. Contrapesos para el dispositivo



Como su nombre lo indica, es la masa o cuerpo que se sujeta en el gancho para generar la carga específica sobre las probetas.

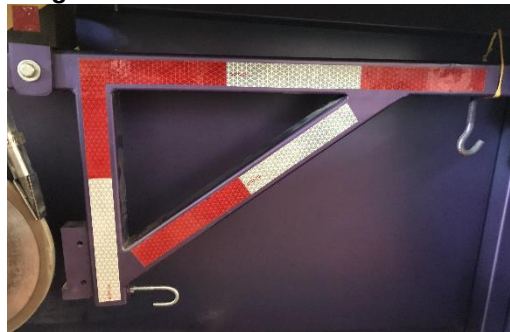
Para la modalidad de ensayo D, la masa es de 0.845g

Para las modalidades de ensayo A, B, C, E y F, la masa es de 5.26 kg

Se recomienda desenganchar la carga del dispositivo cada vez que se finalice un ensayo.

6. Brazo

imagen 6. Brazo instalado



Este elemento se encuentra sujeto a la estructura por medio de un Pin, permitiendo la rotación del brazo sobre un único eje para ejercer la fuerza sobre las probetas. Complementariamente cuenta con un gancho de sujeción horizontal y uno vertical.

Esta pieza es sumamente susceptible a desalinearse, puesto que los elementos de sujeción deben estar perfectamente alineados para permitir que el sujetador de probetas permanezca perpendicular al disco.

Recomendaciones:

- *Desmontar el peso del brazo cada vez que se finalice una prueba.*
- *Evitar forzar el disco lateralmente.*
- *Retirar el brazo en caso de cambiar de posición la máquina.*

7. Tolva

imagen 7. Tolva instalada



La tolva es el depósito principal para el material abrasivo (Arena de Ottawa).

Cuenta con una capacidad superior a 20 litros.

Se recomienda verificar que no tenga humedad, mugre y que no se encuentre obstruida con cualquier tipo de objeto antes de iniciar cada práctica de laboratorio.

8. Llave de Paso

imagen 8. Valvula de paso instalada



La llave de paso o válvula de bola, es un mecanismo de accionamiento manual que restringe o libera el suministro del material abrasivo.

Se recomienda mantenerla cerrada mientras la máquina no está en funcionamiento, para impedir el paso de mugre y cuerpos extraños a la boquilla dosificadora.

9. Acople flexible:

imagen 9. Acople flexible instalado



Es un acople de araña típico. Permite la transmisión de potencia entre el motor-reductor y el disco a través un eje. Cuenta con un núcleo en poliuretano que permite absorber vibraciones y desalineaciones mínimas.

10. Motor - Reductor

imagen 10. Motor-Reductor de engranajes instalado



Es un motor-reductor de engranajes helicoidales y ejes paralelos. Su relación de transmisión es de 8.87:1 permitiendo una velocidad en el eje de salida de 193.9rpm. Se encuentra acoplado a un motor trifásico de 1HP a 1800rpm.

La puesta en marcha del motor-reductor se realiza a través de un pulsador industrial, por lo que el usuario no debe interactuar –directamente- con el motor reductor.

Se recomienda cambiar el líquido lubricante cada 5000hr de uso y revisar el nivel de lubricante al menos una vez al año.

11. Interruptor de encendido

imagen 11. Control de encendido/apagado instalado



Este dispositivo permite el encendido o apagado del motor reductor. Cuenta con dos pulsadores: El verde se acciona para el encendido y el de color rojo se acciona para apagar el motor.

Adicional a ello, cuenta con un cable y conector trifásico.

IV. PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR EL ENSAYO

- ✓ Depositar el material abrasivo en la tolva
- ✓ Garantizar el flujo laminar y constante de material abrasivo (*entre 300 y 400g/min*).
 - b) Permita el flujo de material abrasivo a través de la boquilla dosificadora.
 - c) Garantice que el flujo de material se realiza de manera lineal e ininterrumpida tal y como se muestra en la imagen 1.

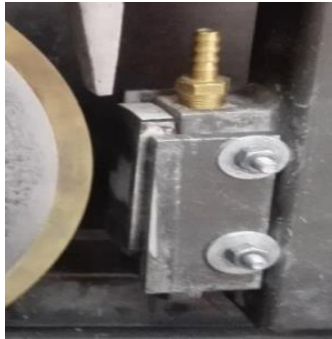
Ilustración 6. Flujo laminar de material abrasivo



- d) Almacenar el material abrasivo que corre a través de la boquilla dosificadora durante 1 minuto
 - e) Utilice la báscula digital para verificar que el material almacenado durante 1 minuto pesa entre 300 y 400grs
4. Limpiar rigurosamente la probeta para garantizar la ausencia de grasa, impurezas o cualquier tipo de suciedad sobre la superficie. A continuación, se debe secar completamente la probeta. La superficie de contacto del disco también debe estar limpia. *(Es indispensable remover absolutamente todas las partículas sobre la superficie de la probeta y esperar a que esté completamente seca. Los residuos de limpiador también deben ser retirados)*
 5. Utilizando la báscula digital, pese la probeta y registre la información. *(es importante registrar 3 cifras significativas y 4 para el procedimiento C).*

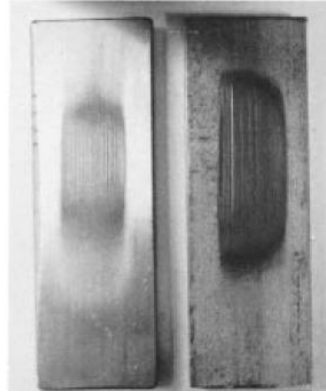
6. Monte la probeta en el sujetador y ajuste los pernos de sujeción.

Ilustración 7. Probeta instalada y sujeta



7. Abra el suministro de material abrasivo y coloque el contrapeso indicado sobre el gancho de sujeción presente en el brazo, posteriormente cierre las compuertas del dispositivo. *(El dispositivo debe permanecer apagado mientras se realizan estos procedimientos)*
8. Encender el dispositivo y comenzar con el registro del tiempo de prueba. *Es importante verificar la velocidad de rotación del disco (200rpm, + o – 10rpm).*
9. Cuando la prueba alcance la abrasión lineal especificada *(tiempo de prueba cumplido o número de revoluciones totales finalizada)*, apague el dispositivo, retire la carga de la probeta liberando el contrapeso del brazo y por último interrumpa el flujo de material abrasivo. *Es sumamente importante mantener el flujo de material abrasivo y la carga sobre las probetas durante todo el procedimiento. Si por algún motivo el ensayo se interrumpe, comience nuevamente la prueba desde el paso 1.*
10. Retire la probeta del dispositivo, límpiela, vuelva a pesarla y registre la información. *Nuevamente con un mínimo de 3 cifras significativas (0.001g) o 4 cifras significativas para el procedimiento C (0.0001g)*
11. Compare la uniformidad de la huella con los ejemplos de la Ilustración 3. Si la huella en la probeta es uniforme, continúe a la actividad 10, de lo contrario verifique la alineación del dispositivo y de ser necesario, repita el ensayo.

**Ilustración 8 Huella uniforme y
huella no uniforme**



Si la huella presente no es uniforme, el disco y el sujetador de probetas se encuentran desalineados, por lo que el resultado de la prueba pierde veracidad.

12. Realizar el respectivo análisis de datos y presentar las conclusiones de la prueba. Los resultados del ensayo deben reportarse como la pérdida de masa en milímetros cúbicos de acuerdo con el procedimiento que se haya realizado, utilice la información adjunta para realizar los cálculos pertinentes.

Debido a que la prueba se realiza sobre un dispositivo avalado por una norma internacional, los resultados del mismo pueden ser comparados con pruebas realizadas por otros dispositivos de iguales características en cualquier parte del mundo. Resultando en una herramienta supremamente útil para comparar el comportamiento de materiales de igual densidad ante las mismas condiciones. Por ello, es necesario que el reporte de resultados se registre de la misma manera y en las mismas unidades para evitar confusiones.

V. RECOMENDACIONES DE USO

- No encender el dispositivo si este se encuentra con las puertas abiertas.
- No introducir elementos ajenos a la naturaleza del ensayo en la tolva.
- Proceder conforme con lo estipulado en la práctica de laboratorio.
- Únicamente utilizar arena de sílice 50/70 para la ejecución de las prácticas de laboratorio.
- La superficie de la probeta que entra en contacto con el recubrimiento de caucho debe ser plana y pulida, ya que, si presenta gránulos, rayas o zanjas, éstos provocarán acanalamiento en la superficie del caucho, alterando los resultados del ensayo y deteriorando de manera prematura la rueda.
- Las muestras de acero que tienen magnetismo residual deben desmagnetizarse, si no es posible, no se deben utilizar
- Nunca dejar presionado el caucho de la rueda por el portaprobeta o probeta cuando el motor está detenido ya que éste se deforma fácilmente, para esto la palanca de liberación de peso debe estar siempre en posición horizontal.
- Verificar periódicamente las dimensiones del recubrimiento de caucho del disco de abrasión, las cuales deben permanecer entre 9 y 8.5 pulgadas.
- Verificar periódicamente el estado general de la boquilla dosificadora, debe permanecer libre de obstrucciones, deterioro y óxido.
- Validar periódicamente la alineación del brazo respecto al disco de abrasión.
- Mantener el dispositivo aseado y libre de humedad.
- Para el traslado del equipo, es recomendable desmontar los componentes susceptibles a desalineación como el disco de abrasión y el brazo.
- Se necesitan al menos 3 personas para trasladar el dispositivo, para lo cual se sugiere retirar la tolva superior y el colector inferior.
- Realizar calibración del equipo cada 3 meses o 30 ensayos.
- Verificar el nivel y estado del lubricante del motor reductor cada 6 meses.

- Los pernos de sujeción del porta-probeta son sólo para mantener fija la probeta durante el ensayo, no exceder el torque de apriete.

VI. MANTENIMIENTO

- ✓ Aplicar grasa de litio a las chumaceras o rodamientos cada 500 horas de funcionamiento.
- ✓ El reductor contiene $\frac{1}{4}$ galón de aceite grado 15w40 que se debe remplazar cada 5000 horas de trabajo.
- ✓ Reemplazar el caucho de la rueda motriz cuando el diámetro del recubrimiento de caucho es inferior a 8 $\frac{1}{2}$ ". Si la rueda se deforma o su concentricidad excede 0,05mm (0,002") es necesario rectificar la goma con herramienta de corte.
- ✓ Limpiar todo el sistema de dosificación de abrasivo cada 3 meses, esto previene la acumulación de partículas.
- ✓ El resto del equipo no requiere mantenimiento específico, solamente se sugiere limpieza periódica o al finalizar cada ensayo.

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
INGENIERÍA MECÁNICA
 Nombre: _____
 Fecha: ____/____/____
 Curso: ____
 Profesor: _____
 Tema: _____
 Fecha de entrega: ____/____/____
 Fecha de calificación: ____/____/____
 Calificación: ____/____
 Firma: _____
 Fecha: ____/____/____

