

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA PARA ENSAYO DE  
DESGASTE ABRASIVO, SEGÚN NORMA TÉCNICA ASTM G65

RONALD SCHNEIDER GAMBA MARTÍNEZ  
RAFAEL ALEXANDER MORALES MORENO  
FAIDER GUILLERMO ORTIZ ROJAS

ESCUELA COLOMBIANA DE CARRERAS INDUSTRIALES  
ESCUELA TECNOLÓGICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA MECÁNICA  
BOGOTÁ D.C.

2013

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA PARA ENSAYO DE  
DESGASTE ABRASIVO, SEGÚN NORMA TÉCNICA ASTM G65

RONALD SCHNEIDER GAMBA MARTÍNEZ  
RAFAEL ALEXANDER MORALES MORENO  
FAIDER GUILLERMO ORTIZ ROJAS

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director de proyecto  
DANIEL EDUARDO VILLALOBOS CORREA  
Ingeniero Mecánico

ESCUELA COLOMBIANA DE CARRERAS INDUSTRIALES  
ESCUELA TECNOLÓGICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA MECÁNICA  
BOGOTÁ D.C.  
2013

Nota de aceptación

Aprobado por el comité de grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Escuela Colombiana de Carreras Industriales para optar al título de Ingeniería Mecánica.

---

Presidente del jurado

---

Jurado

---

Jurado

Bogotá D.C. 11 de diciembre de 2013

## AGRADECIMIENTOS

Quiero darles las gracias a todas aquellas personas que siempre estuvieron prestas a brindarme ayuda, para lograr la culminación de una meta más en mi vida. A mi madre que con su constante motivación y apoyo me ha ayudado a cumplir mis sueños. A mi esposa por su paciencia y comprensión, por sacrificar parte de su tiempo para que yo pudiera cumplir con mis compromisos académicos, a mis profesores por sus lecciones, experiencias y por todo el conocimiento compartido, con todo el cariño les dedico esta tesis.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	1
OBJETIVOS.....	2
GENERAL .....	2
ESPECÍFICOS .....	2
1 DESGASTE .....	3
1.1 DEFINICIÓN.....	3
1.2 MEDIDAS DE DESGASTE .....	5
1.3 CLASIFICACIÓN DEL DESGASTE .....	5
1.4 DESGASTE ADHESIVO.....	7
1.5 DESGASTE ABRASIVO.....	9
1.5.1 CATEGORÍAS DEL DESGASTE ABRASIVO .....	10
1.5.2 MECANISMOS DE DESGASTE ABRASIVO .....	12
1.6 DESGASTE EROSIVO .....	13
1.7 PROPIEDADES DE LA PARTÍCULA.....	16
1.7.1 DUREZA .....	16
1.7.2 FORMA .....	17
1.7.3 TAMAÑO.....	17
1.7.4 TENACIDAD .....	18
1.7.5 EFECTO DE LA CARGA.....	18
1.8 PROPIEDADES DE LA SUPERFICIE .....	18
1.8.1 DUREZA .....	18
1.8.2 DUCTILIDAD.....	19
1.8.3 TENACIDAD A LA FRACTURA .....	19
1.8.4 ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN .....	19
1.8.5 MICRO ESTRUCTURA.....	19
1.8.6 DEFECTOS CRISTALINOS .....	20
1.8.7 FATIGA SUPERFICIAL.....	20

2	DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO .....	21
2.1	DESCRIPCIÓN DE LA MAQUINA .....	22
3	METODOLOGIA DEL ENSAYO .....	28
4	CALCULOS DE DISEÑO .....	30
5	FABRICACION .....	38
6	ADECUACIÓN DE VARIABLES .....	46
6.1	VELOCIDAD DEL DISCO CON RECUBRIMIENTO DE CAUCHO. ....	46
6.2	FLUJO DE LA ARENA A TRAVÉS DE LA BOQUILLA DOSIFICADORA. ....	46
6.3	FUERZA SOBRE LA PROBETA. ....	47
6.4	DUREZA Y DIÁMETRO DEL RECUBRIMIENTO DE CAUCHO. ....	47
6.5	FORMA, TAMAÑO Y HUMEDAD DEL ABRASIVO.....	47
7	PRUEBAS.....	49
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	56
9	BIBLIOGRAFÍA.....	57
10	ANEXOS.....	58

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Modelo esquemático de dos modos de aplicaciones de fuerzas por partículas abrasivas. ....	3
Figura 2 Fuerza de fricción entre la superficie de apoyo y el cuerpo, y que se opone al movimiento. ....	4
Figura 3 Clasificación según el tipo de movimiento .....	6
Figura 4 Categorías del desgaste. ....	7
Figura 5 Esquema de a) dos asperezas que se tocan, b) adhesión entre las dos asperezas, y c) la formación de una partícula de desgaste. ....	8
Figura 6 Mecanismos de desgaste abrasivo. ....	13
Figura 7 Dibujo esquemático de desgaste erosivo. ....	14
Figura 8 Dibujo esquemático de desgaste erosivo. ....	15
Figura 9 Forma de partículas abrasivas. a) Muy angulares b) Angulares. ....	17
Figura 10 Diseño típico de una máquina para ensayo de desgaste abrasivo. ....	22
Figura 11 Disco recubierto de caucho. ....	23
Figura 12 Abrasivo, arena sílice de granulometría AFS 50/70. ....	23
Figura 13 Boquilla dosificadora de arena. ....	24
Figura 14 Motor reductor. ....	25
Figura 15 Contador de revoluciones. ....	25
Figura 16 Brazo mecánico y dispositivo de sujeción. ....	26
Figura 17 Tolva. ....	27
Figura 18 Diagrama de cuerpo libre del brazo mecánico. ....	30
Figura 19 Diagrama de cuerpo libre del eje de transmisión. ....	33
Figura 20 Representación de las fuerzas que actúan en el plano y-z. ....	34
Figura 21 Representación de las fuerzas que actúan en el plano x-z. ....	34
Figura 22 Diagrama de cortante en el plano y-z. ....	35
Figura 23 Diagrama de cortante en el plano x-z. ....	36
Figura 24 Diagrama de momento en el plano y-z. ....	36
Figura 25 Diagrama de momento en el plano x-z. ....	36
Figura 26 Elementos para la estructura de soporte. ....	38
Figura 27 Estructura de soporte. ....	39
Figura 28 Estructura armada. ....	40
Figura 29 Boquilla dosificadora. ....	41
Figura 30 Soporte para el moto reductor. ....	42
Figura 31 Eje de transmisión. ....	42
Figura 32 Disco encauchetado. ....	43

Figura 33 Brazo mecánico.....43  
Figura 34 Mordazas para sujeción de la probeta.....44  
Figura 35 Pesos.....44  
Figura 36 Ensamble general.....45  
Figura 37 Resultados experimentales.....55



## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros de la prueba.....	28
Tabla 2 Datos flujo de arena.....	46
Tabla 3 Dureza del recubrimiento de caucho.....	47
Tabla 4 porcentaje de humedad del abrasivo.....	48
Tabla 5 Características físicas de las probetas.....	49
Tabla 6 Resultado del ensayo en la probeta 1.....	50
Tabla 7 Resultado del ensayo en la probeta 2.....	50
Tabla 8 Resultado del ensayo en la probeta 3.....	51
Tabla 9 Resultado del ensayo en la probeta 4.....	51
Tabla 10 Resultado del ensayo en la probeta 5.....	52
Tabla 11 Resultado del ensayo en la probeta 6.....	52
Tabla 12 Resultado del ensayo en la probeta 7.....	53
Tabla 13 Resultado del ensayo en la probeta 8.....	53
Tabla 14 Resultado del ensayo en la probeta 9.....	54
Tabla 15 Resultado del ensayo en la probeta 10.....	54
Tabla 16 Resultados experimentales.....	55

## INTRODUCCIÓN

El análisis del desgaste tiene gran importancia porque junto con la fatiga y a la corrosión son los problemas que más fallas causan en las máquinas y herramientas [3]. El desgaste es difícil de predecir porque no es una propiedad intrínseca del material, sino que depende de todo el sistema con el que interacciona el cuerpo que se desgasta [4].

El desgaste puede ser definido como el daño superficial sufrido por los materiales después de determinadas condiciones de trabajo a los que son sometidos. Este fenómeno se manifiesta por lo general en las superficies de los materiales, llegando a afectar la sub-superficie. El resultado del desgaste, es la pérdida de material y la subsiguiente disminución de las dimensiones y por lo tanto la pérdida de tolerancias [3]. Casi todas las máquinas disminuyen su vida útil y su confiabilidad debido al desgaste. Por tanto, el control de este fenómeno ha llegado a ser una fuerte necesidad para el desarrollo y confiabilidad de la tecnología.

Los criterios que son clave a la hora de querer controlar el desgaste son: el diseño, las condiciones de operación y los materiales utilizados, ya que dado estos, las tasas de desgaste pueden variar en el intervalo de  $10^{-15}$  a  $10^{-1}$  mm<sup>3</sup>/N.

Predecir el desgaste de una pieza que hace parte de un mecanismo es de gran importancia, porque permite hacer una programación de mantenimiento ajustada a las necesidades de un proceso industrial.

En cuanto a piezas reconstruidas, con procesos de metalizado por proyección, el ensayo de desgaste por abrasión nos abre la posibilidad de conocer con precisión el grado de dureza alcanzado con este procedimiento [3].

La máquina diseñada bajo la norma ASTM G-65, es uno de los ensayos que se practican a diferentes materiales metálicos para conocer su resistencia frente al desgaste por abrasión.

## OBJETIVOS

### GENERAL.

Diseñar y fabricar una máquina para realizar ensayos de desgaste abrasivo según la norma técnica ASTM G65, con el fin de determinar el comportamiento ante el desgaste de diferentes materiales.

### ESPECÍFICOS.

- Adecuar cada una de las variables que intervienen en el proceso del ensayo de desgaste por abrasión, para así hacer un correcto diseño, cálculo y fabricación de la máquina.
- Asegurar condiciones óptimas de funcionamiento, para lograr un buen desempeño de la máquina.
- Realizar guías de laboratorio donde se estipule manual de funcionamiento, rutinas de laboratorio, seguridad, cuidado y mantenimiento.

# 1 DESGASTE

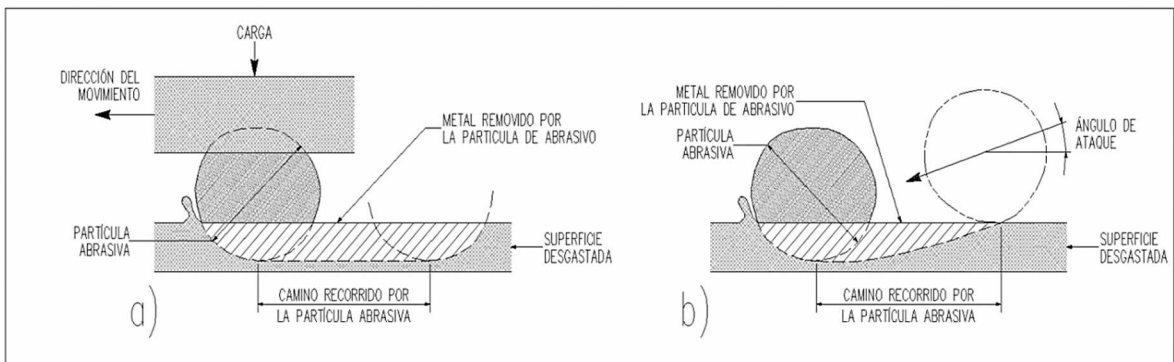
## 1.1 DEFINICIÓN.

El desgaste se puede definir como la pérdida o remoción progresiva de material (erosión) de una superficie sólida producida por otra superficie de igual o mayor dureza, que se encuentran en interacción, ver figura 1. El desgaste tiene gran importancia tecnológica y económica, porque produce cambios en la forma de las herramientas y en consecuencia afecta el tamaño y la calidad de las partes producidas por estas. La magnitud del problema de desgaste en máquinas y herramientas se aprecia en la cantidad de partes y componentes que se deben cambiar o reparar en un proceso de fabricación [4].

Hay muchos ejemplos de desgaste en los procesos de manufactura: las brocas desafiladas que hay que aguzar, los buriles gastados que hay que afilar o calibrar, las herramientas y dados de conformado que se deben reparar o reemplazar, ejes de equipos rotativos que se deben cambiar y en general muchos casos más [3].

**Figura 1** Modelo esquemático de dos modos de aplicaciones de fuerzas por partículas abrasivas.

(a) Acción cortante de una partícula que está bajo presión. b) Acción cortante de partículas libres a través de la superficie de un metal después de impactar sobre la superficie



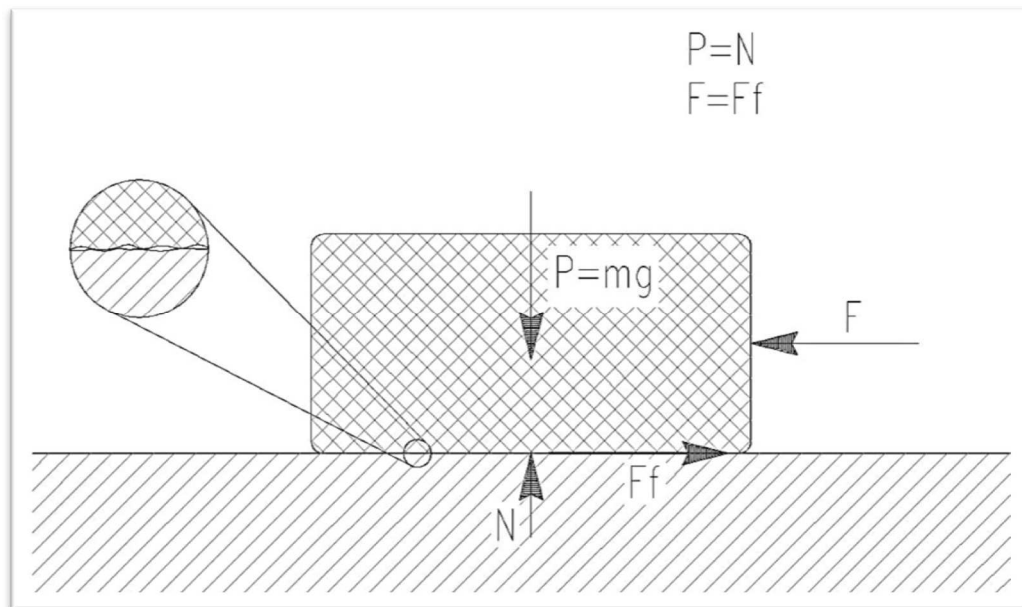
**Fuente:** G. Tovar S.; Fundamentos del Análisis de Falla, Ed. Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá (2005) (Reimpreso) [7]

Aunque el desgaste por lo general, altera la topografía de la superficie de las piezas y puede ocasionar graves daños en la superficie, también puede tener un efecto benéfico. El periodo de asentamiento de diversas máquinas y motores produce esta clase de desgaste, al quitar los picos y asperezas. Así bajo condiciones controladas, se puede considerar que el desgaste es un proceso de alisamiento o pulido [7].

Existe otro término relacionado al desgaste en escenarios donde existe deslizamiento o rodamiento puro sobre un cuerpo o sustancia, este término es conocido como la fuerza de fricción, la cual es la fuerza que se opone al movimiento entre las dos superficies y actúa paralela a la superficie de contacto. La fricción en sistemas de deslizamiento, se considera de gran importancia, ya que si no se controla de manera adecuada puede afectar el desempeño de un lubricante, de las propiedades mecánicas del material o de su recubrimiento [6]. En la figura 2 se observa la magnitud de esta fuerza se encuentra en términos del coeficiente de fricción ( $\mu$ ) y la fuerza normal ( $N$ ) a la superficie, de este modo la fuerza de fricción  $F_f$  está dada por:

$$F_f = \mu N \quad (1)$$

**Figura 2** Fuerza de fricción entre la superficie de apoyo y el cuerpo, y que se opone al movimiento.



Valores típicos para  $\mu$  en rodamientos muy lubricados se encuentran entre 0.03 y 0.04 aproximadamente; para deslizamiento en seco se encuentran valores entre 0.5 hasta 0.8.

**Fuente:** H. Appold, K. Feiler, A. Reinhard, P. Schmidt; Tecnología de los metales, Barcelona - España. (2005) [6].

El coeficiente de fricción entre dos superficies sólidas que se encuentren en contacto, es función de varios factores entre los cuales se encuentran: El acabado superficial de las dos superficies, la carga aplicada sobre los cuerpos, la dirección del movimiento, la velocidad del movimiento y por último la temperatura de la región de contacto [6].

La energía generada por la fuerza de fricción está asociada con la energía total perdida por el sistema de deslizamiento, cuya manera principal de presentarse es en forma de calor, por otro lado, el desgaste se relaciona con la energía generada por el movimiento y por el daño sufrido en la superficie del material, generalmente esta energía es mucho menor comparada con la de fricción [6].

## 1.2 MEDIDAS DE DESGASTE

Para observar y medir el desgaste se pueden usar varios métodos. La elección de uno en particular depende de la exactitud deseada y de las restricciones físicas del sistema (como el tamaño del espécimen o la pieza, o la dificultad para hacer el desarmado necesario para observar las superficies desgastadas).

Aunque no son cuantitativos, los métodos más sencillos son las inspecciones visuales y táctiles (de toque). La medición de los cambios dimensionales, calibración del componente desgastado con rugosimetría, y el pesado de los mismos, son más exactos que las inspecciones visuales y táctiles.

Para propósitos científicos el volumen es frecuentemente la medida para cuantificar este proceso, aunque en algunos casos solo se utiliza la pérdida de masa por su facilidad de medición. Actualmente esta unidad de cuantificación no se puede considerar como medida primaria o directa para desgaste, debido a varios inconvenientes que se presentan con las propiedades de los materiales y con la geometría de la pieza.

Puesto que en aplicaciones de ingeniería lo más importante está relacionado con la pérdida de dimensiones o el cambio en la geometría del elemento, la unidad más utilizada para cuantificar el daño a la superficie, es el volumen. Estos cambios y la pérdida de volumen se relacionan a través de la geometría del surco, teniendo en cuenta que no siempre la relación entre el volumen y dimensión de desgaste es necesariamente lineal [6].

## 1.3 CLASIFICACIÓN DEL DESGASTE

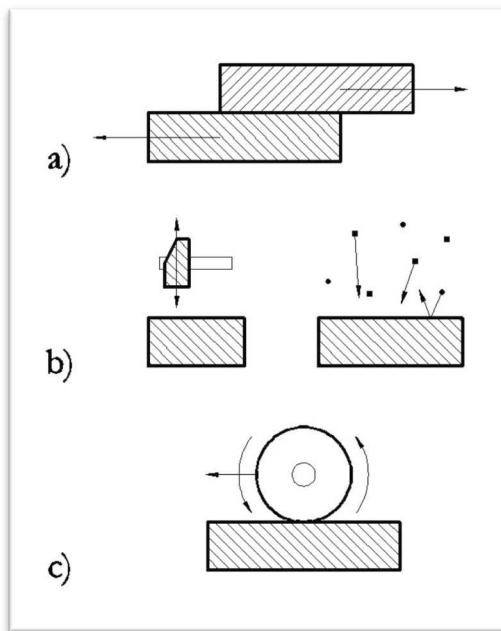
El desgaste es un proceso muy complejo e importante en la práctica de la ingeniería, ya que es un factor que limita tanto el desempeño como la vida útil de los diferentes componentes de una máquina, razón por la cual muchos científicos e ingenieros han tratado de caracterizar este fenómeno, realizando varias clasificaciones y pruebas de laboratorio para el mismo.

Una de estas clasificaciones se basa en las condiciones del medio que rodea al sistema de desgaste, este método de clasificación describe la situación del desgaste en términos de las condiciones macroscópicas que se van a usar en el diseño, de esta manera se encuentran varios subgrupos como: desgaste lubricado, desgaste no lubricado, deslizamiento metal contra metal, metal contra polímero, desgaste a elevadas temperaturas y rodamiento puro, entre otras. Otra clasificación se realiza en base a los diferentes mecanismos de desgaste como

micro corte, micro fatiga, micro arado y micro grietas, aunque esta clasificación es poco aceptada ya que pueden existir situaciones en las cuales se presenten diferentes mecanismos de desgaste al mismo tiempo [4]. La siguiente clasificación se realiza de acuerdo al tipo de movimiento entre las superficies afectadas. Los subgrupos de esta categoría son: deslizamiento, impacto y rodamiento puro como se observa en la figura 3.

**Figura 3** Clasificación según el tipo de movimiento

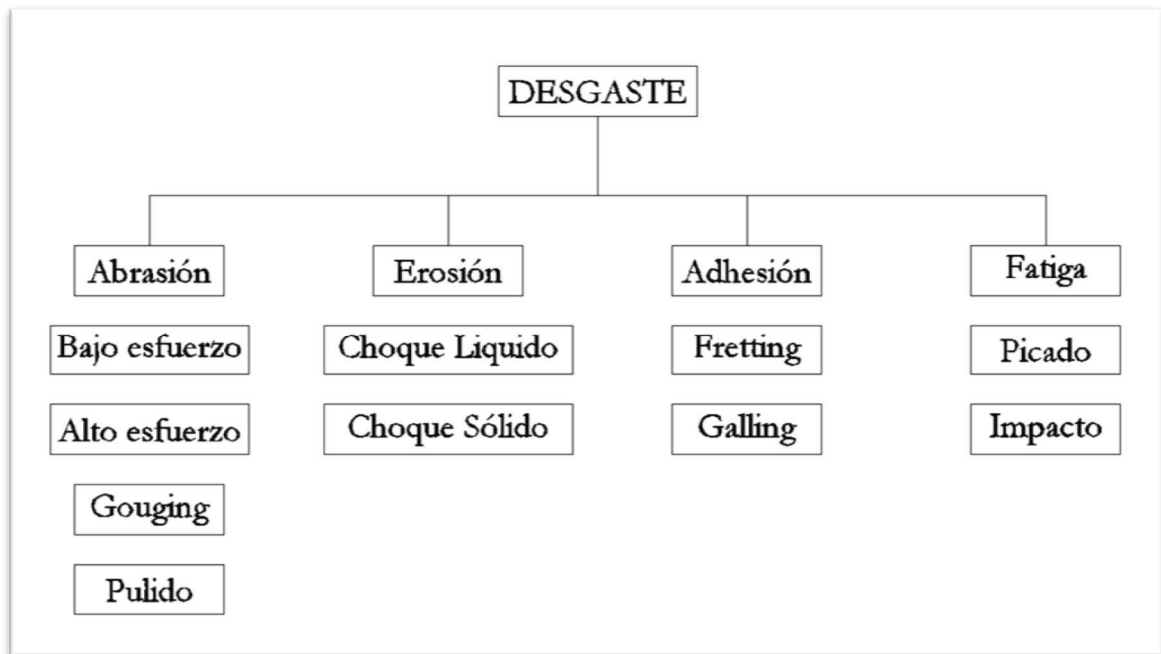
a) Deslizamiento, b) Impacto y c) Rodamiento.



**Fuente:** DAVIS, Joseph R. (Editor); Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance, Ohio. (2001) (Reimpreso) [4].

Aunque en la actualidad no hay un sistema uniforme de clasificación, las cuatro categorías más aceptadas son: adhesión, erosión, abrasión y fatiga de la superficie (Figura 4). La ventaja de esta clasificación consiste en proporcionar una guía al ingeniero para usar un modelo correcto con el fin de proyectar o predecir la vida útil de un elemento sometido a situaciones de desgaste, además de identificar los parámetros importantes del proceso de diseño que pueden ser controlados, como la carga aplicada, la geometría de la pieza, velocidad del movimiento y condiciones del ambiente [4].

**Figura 4** Categorías del desgaste.



**Fuente:** DAVIS, Joseph R. (Editor); Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance, Ohio. (2001) (Reimpreso) [4].

#### 1.4 DESGASTE ADHESIVO.

Desgaste por transferencia de material de una superficie a otra, durante movimiento relativo.

Uno de los aspectos más importantes dentro de esta categoría de desgaste es el área de contacto, esta área generalmente está determinada por el contorno de los cuerpos involucrados en el movimiento relativo.

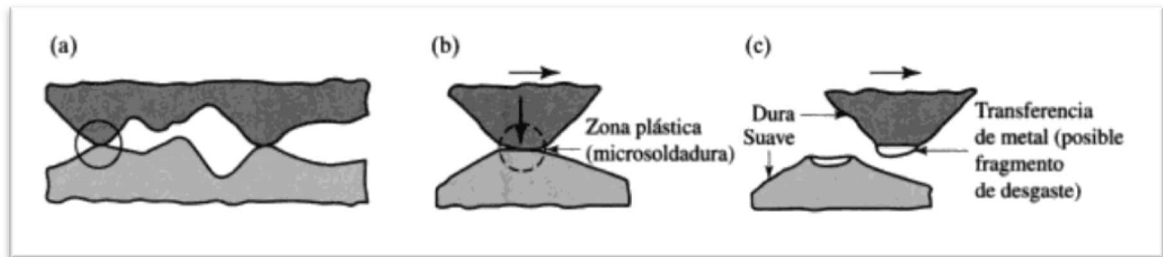
Todas las superficies sólidas poseen asperezas microscópicas y macroscópicas, por lo tanto, estas zonas presentaran cierto grado de rugosidad. Cuando dos superficies comienzan a interactuar bajo una carga normal a estas, las asperezas entran en contacto formando puntos localizados que se conocen como uniones, los cuales establecen el área real de contacto, mientras que el área determinada por las características macroscópicas de la superficie se conoce como área aparente de contacto.

Durante este proceso, la deformación de las uniones puede ser elástica o plástica dependiendo del tamaño de las asperezas, de la carga aplicada, de las propiedades del material y de la cantidad de puntos de contacto [4].



Al presionar las dos superficies, la naturaleza de las fuerzas atómicas indica que se produce adhesión entre los átomos, por lo tanto, cuando comienza el movimiento, la superficie más débil falla y el material es transferido a la otra superficie (figura 5). [4]

**Figura 5** Esquema de a) dos asperezas que se tocan, b) adhesión entre las dos asperezas, y c) la formación de una partícula de desgaste.



**Fuente:** KALPAKJIAN - SCHMID.; Manufactura, ingeniería y tecnología, México (2002) (Reimpreso) [8].

En interacciones posteriores, el material removido puede regresar a la superficie original pero en un lugar diferente o de lo contrario, puede convertirse en escombros. La ecuación propuesta para el volumen de desgaste ( $V$ ) se muestra a continuación y se conoce como la ecuación de Archard para desgaste adhesivo [4].

$$V = \frac{H}{kSL} \quad (2)$$

Donde  $k$  = factor de probabilidad de ruptura para una unión.  $H$  = dureza del material menos duro.  $S$  = distancia del deslizamiento.  $L$  = carga.

Una forma severa de desgaste adhesivo se conoce bajo el término de Galling, donde el material empleado se encuentra sometido a grandes cargas con pobre lubricación. El daño producido por este desgaste se caracteriza principalmente por la gran cantidad de material transferido, que pueden llegar a ser grandes fragmentos o protuberancias de ambas superficies.

Este tipo de desgaste se presenta con más frecuencia en materiales dúctiles debido a que las asperezas tienden a deformarse plásticamente incrementando de esta manera el área de contacto de la superficie, aumentando la probabilidad de que ocurra desgaste adhesivo, por otro lado los materiales frágiles son menos propensos a sufrir este desgaste ya que bajo altas cargas las asperezas tienden a fracturarse.

Otro término utilizado para describir el tipo de daño sobre una superficie causado por la vibración y la corrosión se conoce como fretting, generalmente ocurre entre

dos materiales los cuales se encuentran en un ajuste de interferencia, en donde existe una carga cíclica con un movimiento relativo de muy baja amplitud. Inicialmente el desgaste es adhesivo (se transfiere material de una superficie a otra) generando pequeñas partículas, estos escombros quedan atrapados entre los dos elementos generando desgaste abrasivo o fatiga de la superficie [4].

### 1.5 DESGASTE ABRASIVO.

Se define el desgaste abrasivo como la pérdida de masa resultante de la interacción entre partículas o asperezas duras que son forzadas contra una superficie y se mueven a lo largo de ella. La diferencia entre desgaste abrasivo y desgaste por deslizamiento es el grado de desgaste entre los cuerpos involucrados (mayor en el desgaste abrasivo), ya sea por la naturaleza, tipo de material, composición química, o por la configuración geométrica.

Existen básicamente dos tipos de desgaste abrasivo, estos son: desgaste abrasivo de dos cuerpos y desgaste abrasivo de tres cuerpos. En la abrasión dos cuerpos, el desgaste es causado por rugosidades duras pertenecientes a una de las superficies en contacto, mientras que la abrasión de tres cuerpos, el desgaste es provocado por partículas duras sueltas entre las superficies que se encuentran en movimiento relativo. Como ejemplo de desgaste abrasivo a dos cuerpos, se tiene un taladro penetrando una roca, mientras que a tres cuerpos se puede citar el desgaste sufrido por las mandíbulas de una trituradora al quebrar la roca, o por la presencia de partículas contaminantes en un aceite que sirve para lubricar superficies en contacto deslizante [4].

De acuerdo al nivel del daño sufrido, el desgaste abrasivo se puede clasificar en:

- Abrasión de bajo esfuerzo: se conoce también bajo el nombre de rayado, es el desgaste que ocurre debido a un frotamiento relativamente suave de partículas abrasivas contra superficies o elementos metálicos, se denomina de bajo esfuerzo ya que las cargas son lo suficientemente bajas de tal modo que las partículas no se desintegren o se rompan. Generalmente el daño se presenta en forma de rayado y la deformación de la superficie es mínima
- Abrasión de alto esfuerzo: desgaste donde la fuerza aplicada es lo suficientemente alta como para triturar las partículas. El daño se caracteriza por la deformación plástica, rayado y picado del material, debido a las partículas presionadas sobre el cuerpo.
- 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.
- 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.

### 1.5.1 CATEGORÍAS DEL DESGASTE ABRASIVO

El desgaste de acuerdo al tipo de contacto se puede clasificar en:

**Abrasión de dos cuerpos:** Cuando protuberancias de una superficie se presionan contra un cuerpo más suave.

**Abrasión de tres cuerpos:** Cuando partículas duras se encuentran atrapadas entre dos superficies de modo que la fuerza aplicada se transmite a través de las partículas abrasivas [6].

De acuerdo al nivel del daño sufrido, el desgaste abrasivo se puede clasificar en:

**Abrasión de bajo esfuerzo:** se conoce también bajo el nombre de rayado, es el desgaste que ocurre debido a un frotamiento relativamente suave de partículas abrasivas contra superficies o elementos metálicos, se denomina de bajo esfuerzo ya que las cargas son lo suficientemente bajas de tal modo que las partículas no se desintegren o se rompan. Generalmente el daño se presenta en forma de rayado y la deformación de la superficie es mínima [6].

**Abrasión de alto esfuerzo:** desgaste donde la fuerza aplicada es lo suficientemente alta como para triturar las partículas. El daño se caracteriza por la deformación plástica, rayado y picado del material, debido a las partículas presionadas sobre el cuerpo [6].

**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 [6].

**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 [6].

Las ecuaciones utilizadas para desgaste abrasivo de dos y tres cuerpos se pueden desarrollar a partir del desgaste producido por un solo grano o partícula abrasiva. Para estas ecuaciones se considera una partícula cónica, la cual es presionada contra una superficie más suave, de tal manera que al comenzar un movimiento relativo el grano produce un surco en la otra superficie, cuyo volumen es el área seccional de la indentación por la distancia de deslizamiento [6].

Asumiendo que la carga sobre la partícula es suficiente para que el material experimente deformación plástica, se asume que la carga  $L'$  está dada por:

$$L' = \frac{\rho \pi r^2}{2} \quad (3)$$

Donde  $\rho$  es la dureza del material y se divide sobre dos ya que solo la mitad del cono está en contacto con el material. Por consideraciones geométricas, el área seccional del surco es:

$$A_s = r^2 \tan \theta \quad (4)$$

Por lo tanto el volumen de desgaste,  $dV$ , producido en una distancia de deslizamiento,  $x$  se obtiene de la siguiente forma:

$$dV = \tan \theta dx \quad (5)$$

Integrando:

$$V = 2 \tan \theta \left[ \frac{L}{\pi \rho} \right] x \quad (6)$$

Esta ecuación describe el volumen de desgaste abrasivo producido por un solo grano en una distancia de deslizamiento  $x$ . En estados actuales de desgaste se encuentra una mayor cantidad de granos en el proceso, por lo tanto, el volumen desgastado estará dado por la suma de cada uno de estos [6].

En situaciones reales, es posible que la carga aplicada no solo este soportada por las partículas abrasivas sino también por otro tipo de uniones como las protuberancias de las superficies en contacto, en este caso:

$$mL'' = kL \quad (7)$$

Donde  $m$  es la cantidad de partículas,  $L''$  es la carga equivalente en cada grano y  $k$  es la fracción de la carga total soportada por el abrasivo, de esta manera el volumen desgastado es:

$$V = \frac{2k \tan \left( \frac{\theta}{\pi} \right) Lx}{\rho} \quad (8)$$

Existen algunas situaciones en donde el área seccional de la partícula no es igual al área seccional del surco, ya que esta zona puede ser más grande o mas pequeña que el área de indentación, esto fenómeno depende tanto del material utilizado como de las partículas abrasivas. Si el material tiene un comportamiento dúctil, el área del surco es menor que el área de indentación, debido a que existe mayor deformación elástica que plástica, de esta manera el material recupera parte de su forma original al retirarse la carga, si por el contrario el material tiene un comportamiento frágil, el surco puede ser mayor debido a posibles grietas que se puedan generar durante el deslizamiento y la fuerza aplicada [6].

En estos casos se introduce un factor  $\epsilon$  el cual se define como:

$$\varepsilon = \frac{\text{area del surco}}{\text{area indentada}} \quad (9)$$

$$V = \frac{2\varepsilon k \tan\left(\frac{\theta}{\pi}\right) Lx}{\rho} \quad (10)$$

$$V = \frac{KLx}{\rho} \quad (11)$$

Donde K es un factor que depende de la forma de la partícula, de la naturaleza del proceso y de las propiedades del material. Generalmente los valores de K para desgaste abrasivo de dos cuerpos son mucho mayores a los obtenidos en el desgaste abrasivo de tres cuerpos, esto se debe principalmente a que las partículas están libres dentro del sistemas de deslizamiento, de tal manera que pueden moverse fácilmente sobre la superficie y pueden que no siempre desgasten la pieza, el abrasivo puede rodar por la superficie en vez de deslizarse y formar un surco. En cuanto al tamaño de las partículas se puede decir que entre más grande el abrasivo mayor el valor de K puesto que los granos de gran tamaño están menos influenciados por la rugosidad del material y por los escombros que se puedan interponer, así mismo estas partículas se pueden romper generando granos más puntudos y afilados, las cuales generan aún más daño superficial que las partículas anteriores [6].

El ángulo de ataque entra la partícula y la superficie afectada tiene gran influencia en el daño causado sobre la superficie, así como el grado de indentación de la partícula junto con el esfuerzo cortante que se genera en el material. De este modo entre mayor sea el ángulo de ataque más severo se considera el desgaste. Si este ángulo es alto, el mecanismo por el cual se afecta el material es micro cortado. Si el ángulo se encuentra en un nivel intermedio se produce un fenómeno de cuña en donde la partícula forma un surco irregular debido a material acumulado sobre el grano. Por último si el ángulo es pequeño el mecanismo de desgaste implicado es el micro arado [6].

### 1.5.2 MECANISMOS DE DESGASTE ABRASIVO

Los mecanismos de desgaste explican como el material se remueve de la superficie. Entre los más importantes se encuentran:

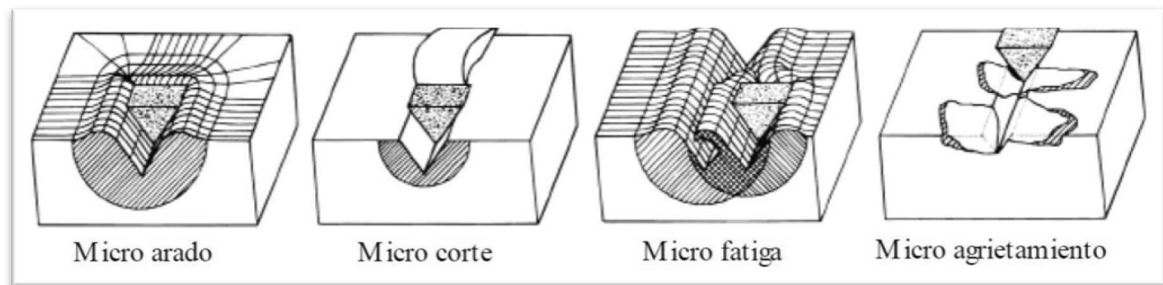
**Micro arado:** No hay remoción de material, la partícula deforma plásticamente al material dejando surcos sobre la superficie, generalmente ocurre bajo cargas ligeras.

**Micro fatiga:** Ocurre cuando las partículas pasan varias veces sobre la superficie dejando surcos a su paso sin remoción de material (cuando el micro arado se presenta repetidamente)

Micro corte: Es el mecanismo de desgaste más severo de todos, el abrasivo remueve material cuando la profundidad de la partícula es relativamente alta.

Micro agrietamiento: Se presenta en materiales frágiles cuando las fuerzas aplicadas por las partículas sobrepasan la tenacidad a la fractura del material, este mecanismo de desgaste aparece cuando hay concentradores de tensión en la superficie.

**Figura 6** Mecanismos de desgaste abrasivo.

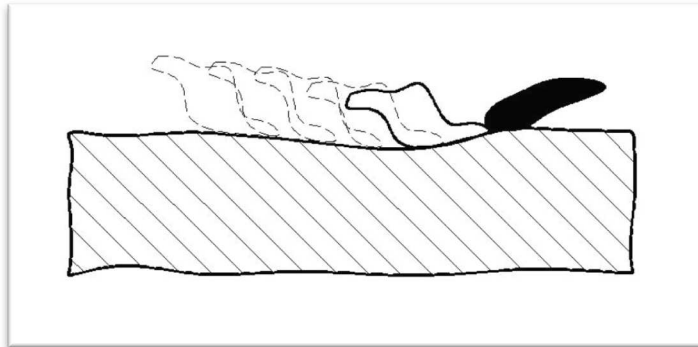


**Fuente:** KALPAKJIAN - SCHMID.; Manufactura, ingeniería y tecnología, México (2002) (Reimpreso) [8]

## 1.6 DESGASTE EROSIVO

En esta forma de desgaste, la pérdida de material de la pieza se genera por medio de repetidos impactos de partículas sólidas contenidas en un fluido, las cuales se mueven a través de toda la superficie del material. Estas partículas pueden acelerar o desacelerar y a su vez cambiar la dirección de movimiento por el fluido. El desgaste en tuberías causado por la mezcla de de partículas abrasivas en un medio liquido es uno de los ejemplos del desgaste erosivo, así como el daño causado por arena en un flujo de aire [6].

**Figura 7** Dibujo esquemático de desgaste erosivo.



**Fuente:** KARL-HEINZ Zum Gahr; Microstructure and wear of materials, Países Bajos (1987) (Reimpreso) [9]

La erosión de una superficie también puede ocurrir en un medio líquido sin la presencia de partículas duras abrasivas, este tipo de daño superficial recibe el nombre de erosión líquida, en donde la cavitación es un mecanismo representativo de este tipo de desgaste, esta erosión incluye remoción progresiva del material de una superficie, por medio de repetidas cargas de impulso en áreas microscópicas [6].

El daño producido por la erosión se caracteriza por:

-Superficie rugosa.

Rayado sin dirección específica. En esta situación de desgaste las variables que mayor influencia tienen en este proceso, se pueden clasificar en tres tipos:

1. Variables de choque: describen el flujo de la partícula.

Velocidad.

Angulo de ataque.

Concentración de partículas.

2. Variables de la partícula:

Forma -Tamaño

Dureza

3. Variables del material:

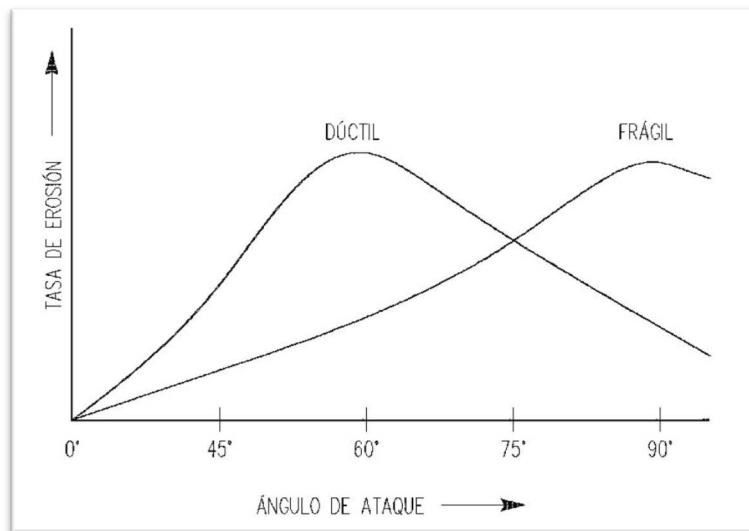
Dureza

Micro estructura y densidad

Dentro de las variables de choque, la más importante es el ángulo de ataque entre la partícula y la superficie, debido a la gran influencia que tiene sobre la tasa de material removido, de esta manera, este ángulo determina si el mecanismo de desgaste es micro cortado o micro arado, por lo tanto, debajo de un punto crítico hay deformación plástica solamente [6].

En el desgaste erosivo el efecto del ángulo depende del comportamiento del material, si este es frágil o dúctil.

**Figura 8** Dibujo esquemático de desgaste erosivo.



**Fuente:** BAYER, Raymond; Mechanical wear prediction and prevention, New York N.J; EEUU (1994) (Reimpreso) [3]

La fractura frágil tiende a incrementar el volumen de desgaste debido a que los materiales frágiles son más propensos a fracturarse bajo condiciones de impacto, por lo tanto estos materiales experimentan una mayor tendencia a la fractura al aumentar el ángulo de incidencia. En materiales dúctiles los mecanismos predominantes de desgaste son micro cortado y micro arado, en estos casos la carga aumenta con el ángulo y el deslizamiento decrece con el ángulo [3].

El ángulo crítico se puede determinar por medio del coeficiente de fricción de la siguiente manera:

$$\tan(90 - a_c) = \frac{1 - \mu^2}{2\mu} \quad (12)$$



Donde  $\alpha_c$  es ángulo crítico para cortado (usualmente este ángulo se encuentra entre 30° y 60°) y  $\mu$  es el coeficiente de fricción.

La carga que se genera entre la superficie y la partícula resulta del momento y la energía cinética de la partícula, por este motivo la fuerza normal se convierte en la fuerza de fricción de la siguiente manera:

$$F = \mu L \quad (13)$$

Reemplazando L en la ecuación de volumen de desgaste abrasivo:

$$V = \frac{kFx}{\mu\rho} \quad (14)$$

En este caso  $Fx$  representa la energía disipada por el deslizamiento durante el impacto. Si se reemplaza esta energía por la energía cinética, E, de una partícula de masa L y velocidad v. Teniendo en cuenta que se disipa una fracción  $\beta$  de la energía al impactar la superficie, el volumen de desgaste esta dado por:

$$E = \frac{Mv^2}{2\mu\rho} \quad (15)$$

$$V = \frac{k\beta Mv^2}{2\mu\rho} \quad (16)$$

Si bien las condiciones del desgaste erosivo son muy similares con las de desgaste abrasivo, se pueden manifestar grandes diferencias entre estos dos procesos. El primero de estos se fundamenta en la forma por la cual las partículas se mueven sobre las superficies, en este caso los granos golpean el cuerpo y rebotan sobre este. De este modo la fuerza ejercida en el sistema se debe a las componentes dinámicas de las partículas, como la velocidad y la aceleración. Mientras que en el desgaste abrasivo las partículas se deslizan sobre la superficie bajo una fuerza externa aplicada [3].

## 1.7 PROPIEDADES DE LA PARTÍCULA.

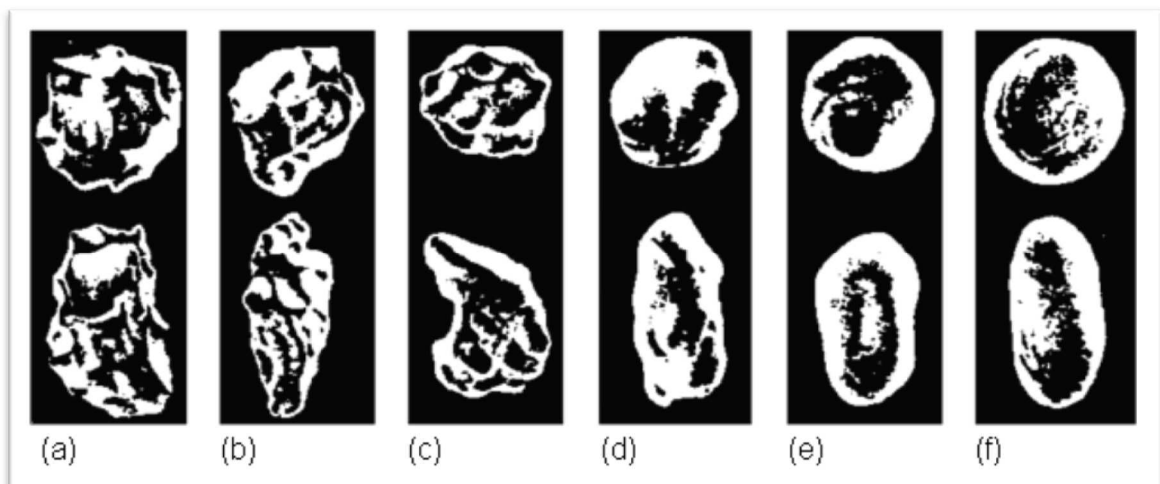
### 1.7.1 DUREZA

Si la dureza de la partícula es mayor a la de la superficie empleada, el grano es capaz de penetrar el material y formar un surco sobre este. El abrasivo se considera duro, cuando su dureza es mayor a la del material en contacto. Específicamente si esta propiedad es superada en un 20 % por el grano. Por el contrario una partícula se considera blanda si su dureza es menor a la del material. Aunque esta clase de abrasivo no es capaz de indentar el cuerpo en contacto, si puede desgastarlo por medio de fatiga superficial [4].

### 1.7.2 FORMA

La tasa a la cual el material es removido de la superficie, está fuertemente relacionado con la forma de la partícula, puesto que esta propiedad determina la geometría y forma del surco generado, influenciando también el efecto de la carga sobre el área de contacto. Dentro de las formas más comunes de partículas se encuentran las de tipo angular y las redondas (Figura 9). Estas últimas tienden a conservar su forma durante el movimiento relativo en sistemas de deslizamiento, por este motivo son las más utilizadas para los ensayos relacionados con desgaste abrasivo. La diferencia entre la forma de las partículas se refleja en la tasa de desgaste, donde para partículas de tipo angular la magnitud de esta, es diez veces mayor a la tasa de desgaste para partículas redondas [4].

**Figura 9** Forma de partículas abrasivas. a) Muy angulares b) Angulares c) Sub angulares d) Sub redondeadas e) Redondeadas f) Muy redondeadas.



**Fuente:**

<http://msnucleus.org/membership/html/jh/earth/sedimentary/lesson3/sedimentary3d.html>

### 1.7.3 TAMAÑO

Los tamaños más comunes de granos para desgaste abrasivo y erosivo se encuentran entre 5 y 500  $\mu\text{m}$ . Aunque existen situaciones extremas donde las partículas son sub microscópicas como es el caso del pulido. Otra situación similar se presenta en el fenómeno de gouging donde el tamaño del abrasivo es de cientos de milímetros [4].

Un ensayo habitual dentro de la comunidad científica para analizar esta propiedad consiste en probar una sola clase de material, variando el tamaño de las partículas abrasivas.

A partir de los datos arrojados por esta prueba se ha podido observar que existe un tamaño crítico para el grano, donde la tasa de desgaste alcanza un valor constante, indicando que desde este punto el desgaste es independiente del tamaño. Por debajo del punto crítico la tasa de desgaste disminuye a medida que el tamaño de las partículas decrece [4].

#### 1.7.4 TENACIDAD

La tenacidad se define como la resistencia que opone un mineral u otro material a ser molido, doblado o desgarrado, siendo una medida de su cohesión. Esta propiedad se relaciona con la capacidad de absorber energía por el material. Al aumentar la tenacidad de las partículas, estas tendrán la capacidad de almacenar su potencial de generación de daño, a través de todo su recorrido por la superficie, es decir por la totalidad de la distancia de deslizamiento. Por este motivo la tenacidad es de gran importancia en situaciones en las cuales exista desgaste abrasivo o erosivo [4].

#### 1.7.5 EFECTO DE LA CARGA

A partir la ecuación de Archard se observa que el volumen desgastado es proporcional a la carga aplicada sobre el elemento. Esta relación se altera en situaciones en las cuales la carga normal es tan grande que puede aplastar y fragmentar las partículas abrasivas. Al descomponerse los granos, pueden aparecer dos situaciones distintas dependiendo de la forma de las nuevas partículas. Si estas son de tipo angular el volumen desgastado se incrementará. Si por el contrario los granos se redondean el desgaste disminuirá considerablemente [4].

### 1.8 PROPIEDADES DE LA SUPERFICIE

#### 1.8.1 DUREZA

Una de las propiedades más importantes dentro de los procesos de desgaste, es la dureza, ya que está directamente relacionada con el grado de penetración del abrasivo sobre la superficie.

De la mayoría de materiales ensayados, la resistencia al desgaste abrasivo aumenta con la dureza. Sin embargo esta propiedad no puede predecir la resistencia al desgaste de un material, ya que las interacciones entre las partículas abrasivas y el material no siempre se conocen con certeza. Materiales diferentes con el mismo valor de dureza presentan gran diferencia en la resistencia al desgaste. Cuando los materiales disminuyen su resistencia a medida

que la dureza aumenta, el desgaste se presenta por medio de fractura, estos casos tienden a presentarse con frecuencia en materiales altamente frágiles [4].

### 1.8.2 DUCTILIDAD

La ductilidad del material afecta especialmente el tipo de mecanismo por el cual el material se remueve de la superficie y la geometría de los surcos generados. Un material dúctil tendrá un surco más pequeño que la partícula abrasiva debido a que gran parte de la deformación es elástica [4].

### 1.8.3 TENACIDAD A LA FRACTURA

La resistencia a la propagación de grietas es de gran utilidad en materiales frágiles, en donde el mecanismo de desgaste más común es el de micro grietas. Entre mayor sea la tenacidad a la fractura menor será la probabilidad de que los materiales experimenten desgaste por este mecanismo [4].

### 1.8.4 ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN

A medida que la partícula comienza a deformar la superficie, la zona afectada empieza a sufrir cambios en sus propiedades mecánicas, entre las cuales está la dureza. Un material que exhiba bajo endurecimiento por deformación presentara baja resistencia al desgaste. Por este motivo al analizar sistemas de desgaste abrasivo se debe tener en cuenta la dureza del material deformado.

Los parámetros externos que influyen en esta propiedad son: el tipo de contacto, la carga, la temperatura y el tamaño de las partículas, entre otros. Dentro de los parámetros internos en este tipo de endurecimiento, el más importante es la micro estructura.

Cuando la deformación es plástica, esta se puede distribuir homogénea o heterogéneamente dentro del material, dependiendo del tipo de estructura cristalina. Si un material es poli cristalino puede presentar cambios sustanciales en la distribución de la deformación [4].

### 1.8.5 MICRO ESTRUCTURA

Dentro de la micro estructura de un material, las inclusiones contribuyen a la resistencia al desgaste, ya que la mayoría de estas son concentradores de esfuerzos, por lo cual, aceleran la formación de grietas. Las inclusiones se pueden presentar en formas muy variadas, desde esféricas hasta alargadas. Dentro de los tipos más importantes de inclusiones se encuentran: silicatos, óxidos, sulfuros y aluminatos.

Por otro lado, los metales de una sola fase aumentan la resistencia al desgaste cuando se incrementa su dureza. En cuanto a los materiales de más de dos fases la resistencia al desgaste depende tanto de las propiedades de la matriz como de los constituyentes y de la interacción entre las fases.

Ensayos de desgaste para diferentes micro estructuras de aceros han mostrado diferentes tendencias relacionadas con la resistencia al desgaste. Materiales con diferente micro estructura pero con la misma dureza, presentan distintos valores en cuanto a la resistencia al desgaste. Aceros austeníticos tienen mayor resistencia que los aceros perlíticos y bainíticos de igual valor de dureza, mientras que los martensíticos presentan menor resistencia. Una posible explicación para este fenómeno se basa en la ductilidad del material.

Los materiales austeníticos dúctiles, presentan un desgaste abrasivo caracterizado por los mecanismos de micro corte y micro arado. Mientras que los materiales martensíticos frágiles el desgaste abrasivo actúa bajo los mecanismos de micro corte, micro arado y micro agrietamiento [4].

#### 1.8.6 DEFECTOS CRISTALINOS

Los átomos intersticiales pueden llegar a incrementar sustancialmente la resistencia y dureza de las aleaciones ferrosas, debido a que estos átomos pueden incrementar considerablemente la capacidad de endurecimiento por deformación, afectando negativamente su ductilidad.

La cantidad de límites de grano tiene gran influencia en la resistencia al desgaste abrasivo, puesto que estos son el camino a recorrer de los diferentes defectos micro estructurales [4].

#### 1.8.7 FATIGA SUPERFICIAL.

En algunos escenarios de desgaste se puede presentar el caso donde la dureza del material es mayor a la dureza de los granos, en esta situación la superficie continua desgastándose en forma diferente.

Con repetidos deslizamientos o impactos el material experimenta esfuerzos cíclicos en la superficie, como resultado de estos esfuerzos se generan grietas en la región afectada, con un mayor número de ciclos las grietas comienzan a propagarse. Estas grietas producen partículas libres las cuales son removidas de la superficie durante el proceso. Este procedimiento continúa, resultando en pérdida progresiva del material [4].

## 2 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

Desgaste abrasivo, desgaste por partículas duras o protuberancias duras forzadas en contra y en movimiento a lo largo de una superficie sólida. Esta definición cubre varios métodos o mecanismos que entran en la categoría desgaste por abrasión.

Este método de ensayo cubre los procedimientos de laboratorio para determinar la resistencia de materiales metálicos al desgaste por abrasión, por medio de la prueba de rueda de caucho y arena seca. El principal objetivo de este ensayo es producir datos que permitan clasificar diferentes tipos de materiales en cuanto a su resistencia al rayado por abrasión bajo un conjunto específico de condiciones controladas.

En resumen, el ensayo se realiza entre una probeta y una rueda giratoria con un recubrimiento de caucho tipo clorobutilo con una dureza especificada. La probeta se presiona contra la rueda que gira, y con una fuerza determinada que es ejercida por medio de un brazo que hace las veces de palanca, mientras que un flujo controlado de arena raspa la superficie de ensayo. La rotación de la rueda es tal que su cara se mueve en contacto en la dirección del flujo de arena. El eje del pivote del brazo de palanca se encuentra dentro de un plano que es aproximadamente tangente a la superficie de la rueda de goma, y normal al diámetro horizontal a lo largo de la cual se aplica la carga. La duración del ensayo y la fuerza aplicada por el brazo de palanca es variada. Las muestras se pesan antes y después de la prueba y la pérdida de masa son registrados. Es necesario convertir la pérdida de masa a la pérdida de volumen en milímetros cúbicos, debido a las grandes diferencias en la densidad de los materiales.

Los resultados de la prueba de abrasión se resumen como una pérdida de volumen en milímetros cúbicos. Materiales con mayor resistencia a la abrasión tendrán una menor pérdida de volumen.

La cantidad de desgaste por abrasión en cualquier sistema dependerá del tamaño de las partículas abrasivas, la forma y la dureza, la magnitud de la tensión impuesta por la partícula, y la frecuencia de contacto de las partículas abrasivas. En esta práctica, estas condiciones están estandarizadas para desarrollar un uniforme de condición de desgaste que se ha denominado abrasión.

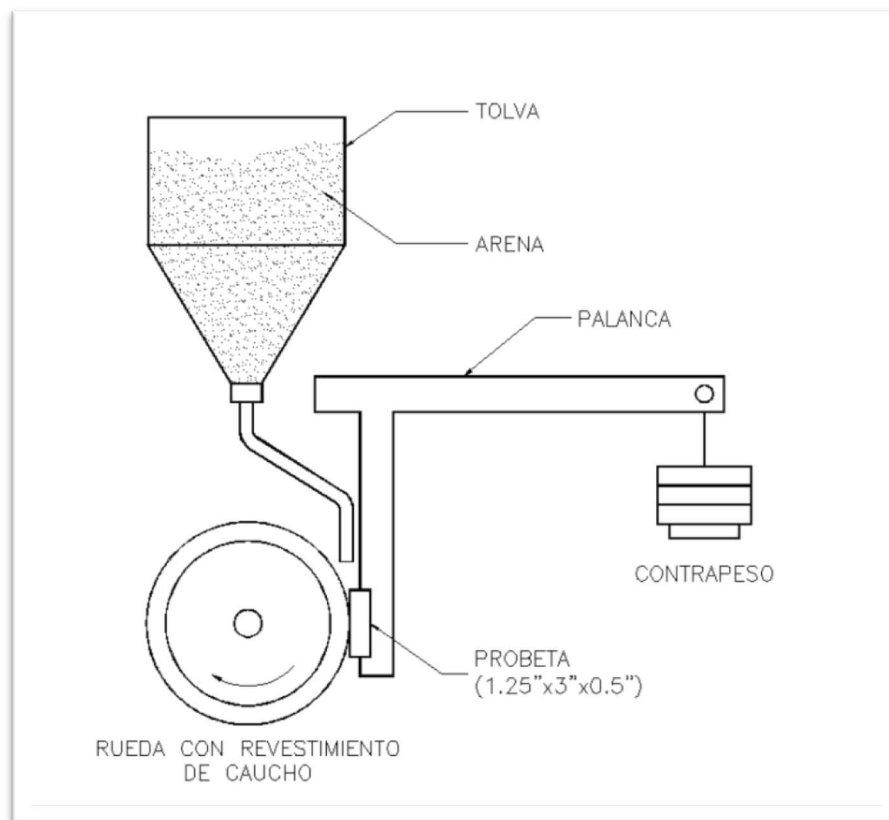
El valor de la práctica radica en la predicción de la clasificación relativa de los diversos materiales de construcción en un ambiente abrasivo. Dado que la práctica no trata de duplicar todas las condiciones del proceso (el tamaño de abrasivo, la forma, la presión, impacto o elementos corrosivos), no debe ser usado para predecir la resistencia exacta de un determinado material en un entorno específico. Su valor reside en la predicción de la clasificación de materiales en un orden similar en relación a como ocurriría en un ambiente abrasivo. La comparación proporcionará una indicación general del valor de los materiales que

se desconoce si la abrasión es el factor predominante que causa el deterioro de los materiales [1].

## 2.1 DESCRIPCIÓN DE LA MAQUINA

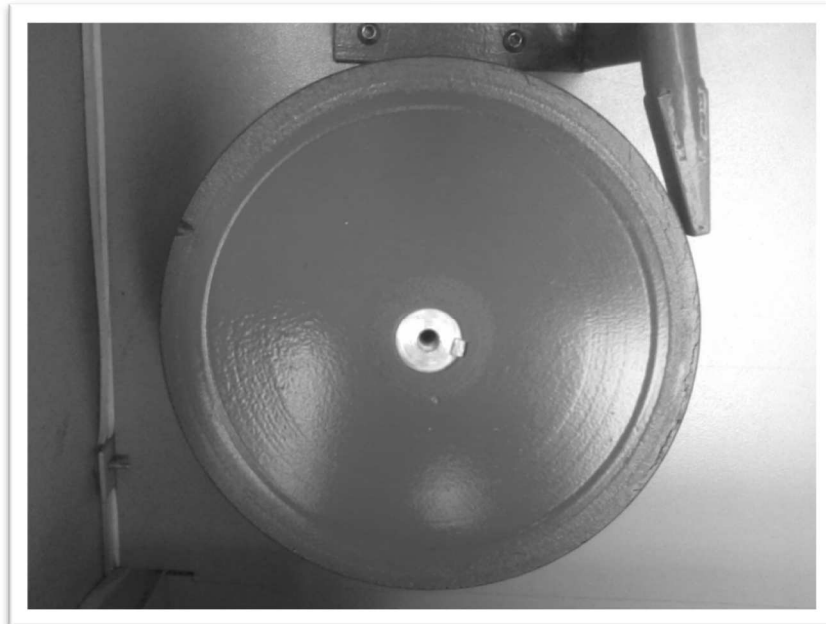
En la figura 10 se muestra un esquema del diseño típico, que puede ser construido a partir de materiales de fácil obtención. Varios elementos de la maquina son de vital importancia para asegurar la uniformidad de la prueba, estos son: el tipo de caucho usado para recubrir la rueda, el tipo de abrasivo y su forma, una palanca adecuada para aplicar la fuerza adecuada [1].

**Figura 10** Diseño típico de una máquina para ensayo de desgaste abrasivo.



**Fuente:** Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand and Rubber Wheel Apparatus ASTM-G65 (Reimpreso) [1]

**Figura 11** Disco recubierto de caucho.



Está compuesta por un disco de acero AISI 1020 recubierto en toda su periferia por un caucho de clorobutilo moldeado, la dureza optima del caucho deberá estar entre 58 y 62 shore A. Se deberán tomar lecturas de dureza sobre el caucho como mínimo en 4 puntos distintos cada uno separado 90° aprox. De acuerdo con la norma ASTM D 2240 [1].

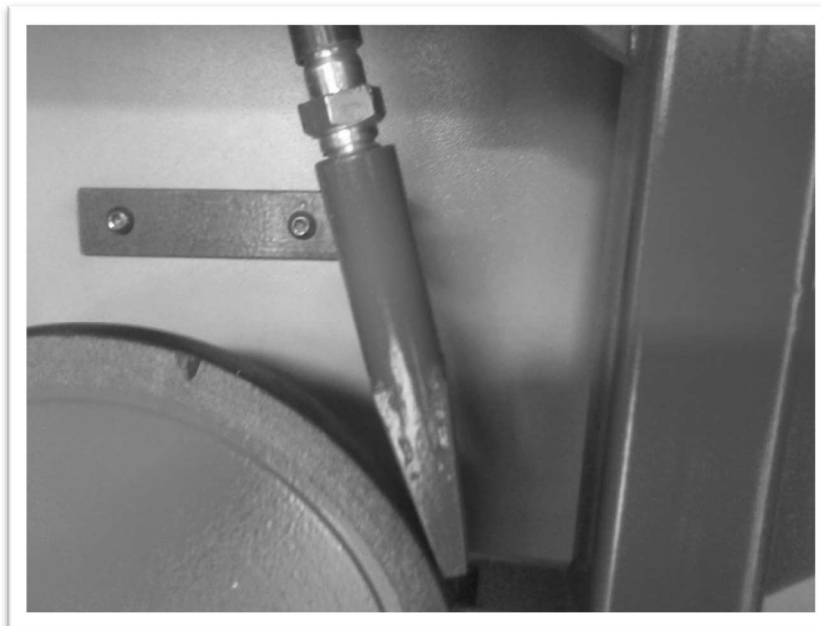
**Figura 12** Abrasivo, arena sílice de granulometría AFS 50/70.





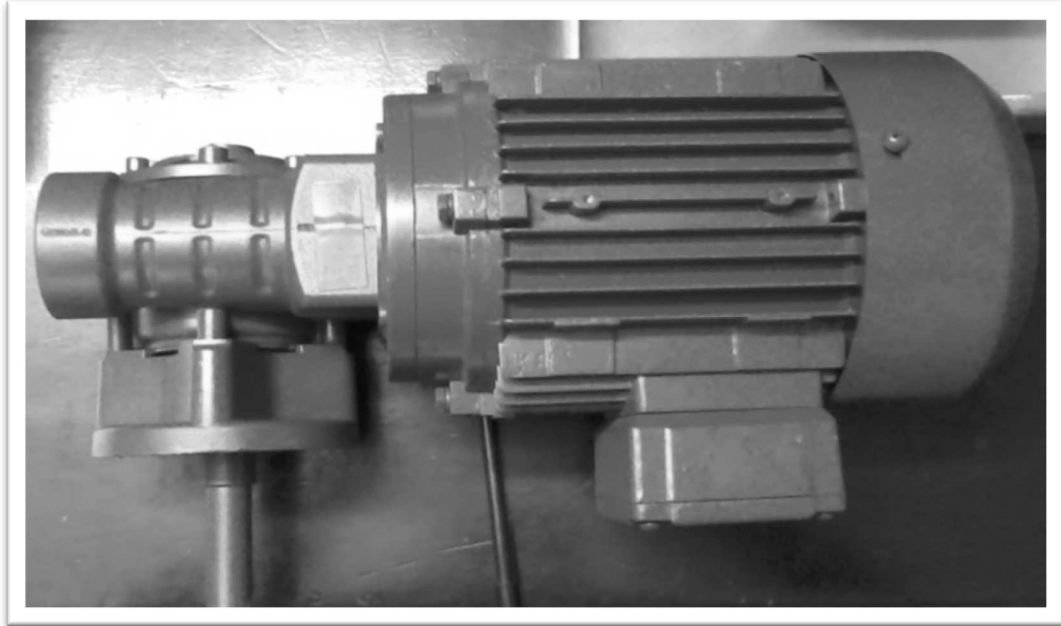
El tipo de abrasivo será una arena de grano redondeado de tamaño fino (AFS 50/70), el contenido de humedad no puede superar el 5% en peso, ya que un porcentaje mayor provocaría una disminución considerable en el flujo de la arena a través de la boquilla dosificadora, afectando los resultados de la prueba. El contenido de humedad puede determinarse midiendo la pérdida de peso calentando una muestra a 120°C durante una hora mínimo. Si la muestra contiene exceso de humedad se deberá calentar de nuevo la muestra a 100°C durante una hora más. Este procedimiento debe repetirse hasta obtener el porcentaje de humedad requerido [1].

**Figura 13** Boquilla dosificadora de arena.



El diseño de la boquilla debe ser tal que permita un flujo de arena preciso y en forma de cortina, la boquilla puede ser de cualquier longitud pero que permita la conexión a la tolva utilizando un tubo de plástico. El orificio de salida de la arena se debe ajustar de tal forma que se pueda desarrollar una velocidad del flujo de la arena de 300 a 400 g/min. La boquilla debe estar ubicada tan cerca de la unión entre la probeta y la rueda de caucho como el diseño lo permita. El flujo de la cortina de arena debe ser aerodinámica, estrecha y laminar, un flujo turbulento puede producir resultados inconsistentes [1].

**Figura 14** Motor reductor.



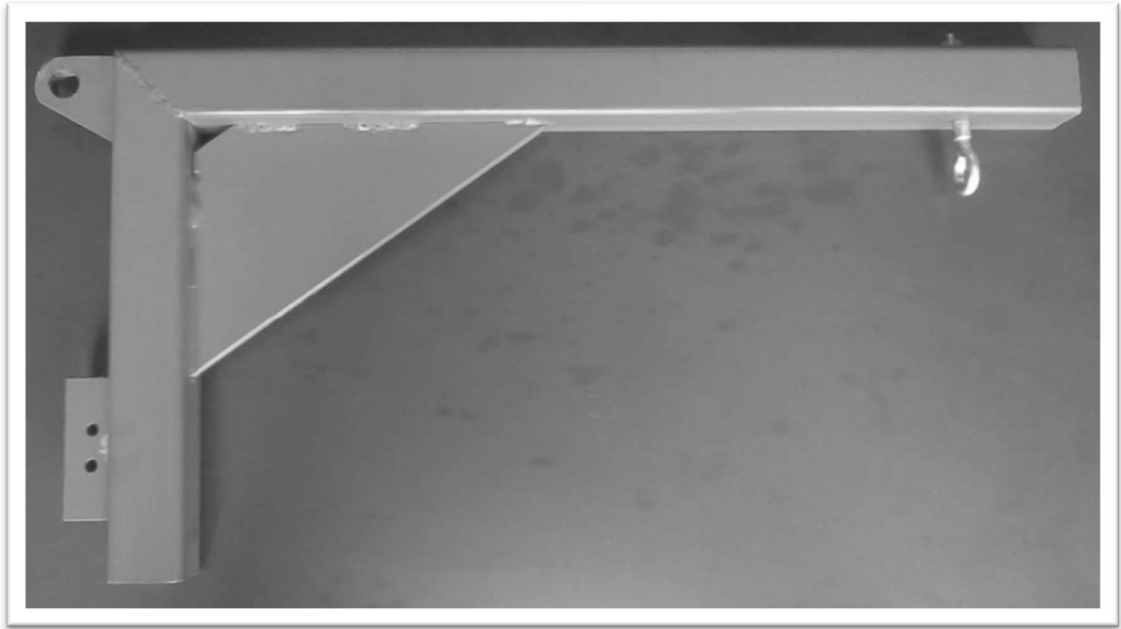
La rueda es impulsada por un motor eléctrico de corriente alterna con una potencia nominal mínima de 0.88 kW (1.2 HP) y como la velocidad de rotación debe ser  $200 \pm 10$  rpm, que debe permanecer constante durante la carga, es necesario usar una caja reductora.

**Figura 15** Contador de revoluciones.



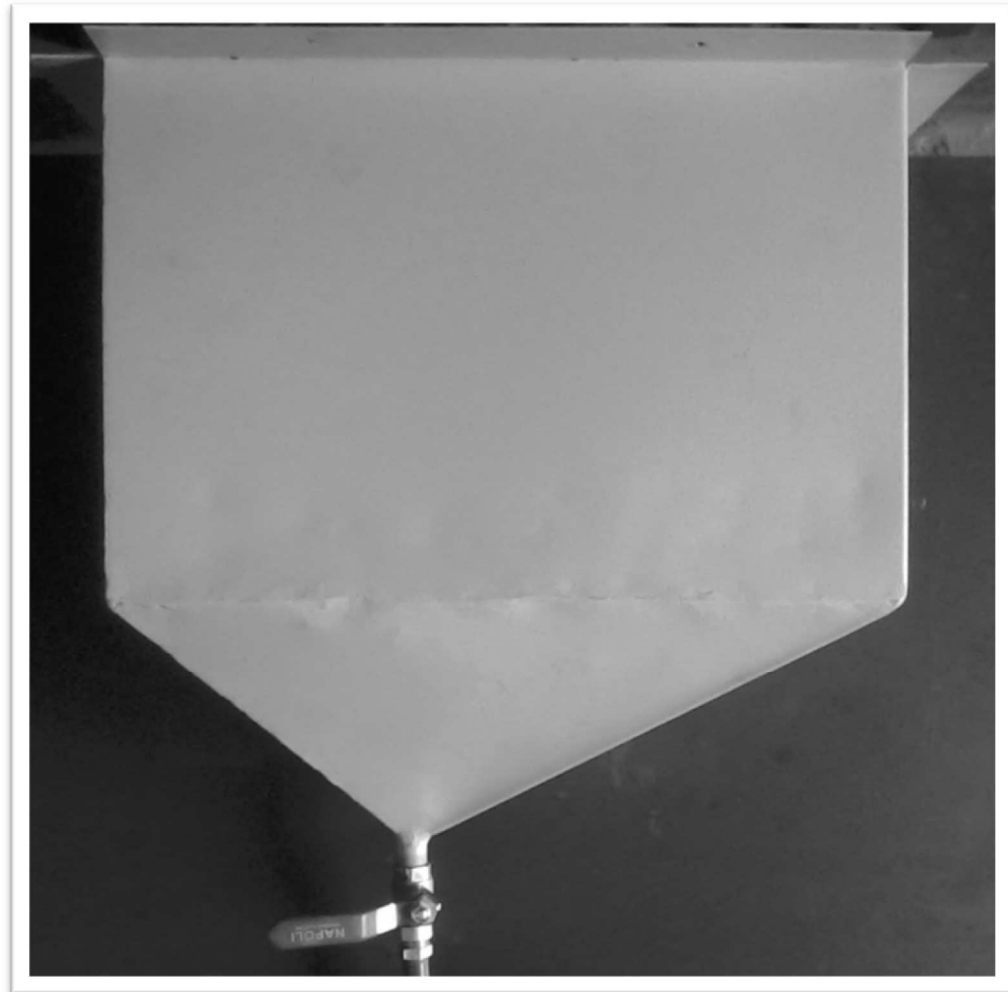
La máquina estará equipada con un contador de revoluciones que hará un seguimiento del número de revoluciones de la rueda tal como se especifica en el procedimiento. Se recomienda que el contador tenga la capacidad de apagar el motor una vez se alcance el número de revoluciones necesario para realizar la prueba.

**Figura 16** Brazo mecánico y dispositivo de sujeción.



La probeta se coloca contra la rueda encauchetada por medio de un brazo mecánico. Que a su vez está sometido a una carga en el extremo opuesto a este con el fin de mantener la probeta siempre en contacto con la rueda y así generar la abrasión, el brazo está construido en tubo cuadrado en acero ASTM A-36, y el dispositivo de sujeción con platinas colocadas como mordazas atornilladas, su función es sostener la probeta mientras se realiza el ensayo.

**Figura 17** Tolva.



Este elemento es el encargado de almacenar las partículas abrasivas (arena) requeridas para el ensayo, está provista de una válvula que controla el flujo del abrasivo a través de la boquilla.

### 3 METODOLOGIA DEL ENSAYO

En el ensayo, principalmente se pretende controlar la distancia de deslizamiento (numero de revoluciones) y la fuerza normal aplicada sobre la probeta.

Según la norma ASTM-G65 están definidos cinco procedimientos que se describen a continuación:

Procedimiento A: este procedimiento es el más severo de todos, en donde la distancia de deslizamiento y la fuerza normal son relativamente altas, generando una mayor tasa de remoción de material. Es particularmente útil para materiales de alto a medio rango de resistencia a la abrasión extrema [1].

Procedimiento B: es una variación del procedimiento A, es útil para la clasificación de materiales de media y baja resistencia a la abrasión. El procedimiento B se debe utilizar cuando los valores de pérdida de volumen desarrollados por el procedimiento A superan los 100 mm<sup>3</sup> [1].

Procedimiento C: es una variación del procedimiento A, para uso en revestimientos delgados [1].

Procedimiento D: es una variación del procedimiento A, utilizado para materiales de baja resistencia a la abrasión [1].

Procedimiento E: es una variación del procedimiento B, es útil en la clasificación de materiales con media y baja resistencia a la abrasión [1].

**Tabla 1** Parámetros de la prueba.

PROCEDIMIENTO	FUERZA CONTRA LA PROBETA	REVOLUCIONES DEL DISCO	ABRASIÓN LINEAL
A	130 N	6000	4309 m
B	130 N	2000	1436 m
C	130 N	100	71.8 m
D	45 N	6000	4309 m
E	130 N	1000	718 m

**Fuente:** Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus ASTM-G65 [1].

El procedimiento para realizar el ensayo se describe a continuación:

Se prepara la muestra, una probeta de 3" de largo por 2" de ancho y un espesor que poder variar entre 1/4" y 1/2". La probeta debe ser limpiada con agua y jabón, posterior a esto se enjuaga con alcohol y se seca con aire caliente [1].

Pesaje: se debe pesar la probeta para conocer su masa inicial para esto se debe usar una balanza electrónica con una apreciación de mínimo dos decimales.

Se posiciona la muestra en el dispositivo de sujeción.

Se carga el brazo mecánico con el contrapeso requerido según el procedimiento a realizar.

Se Abre el paso de arena para que fluya a través de la tobera, el flujo debe estar entre 300 y 400 gr/min [1].

Se hace girar la rueda encauchetada accionando el motor.

Se Mueve el brazo mecánico para que la probeta haga tangencia con la rueda.

Una vez completados los ciclos requeridos por el procedimiento, se detiene el motor y se detiene el flujo de arena.

Se saca la probeta del dispositivo de sujeción, y se repite el proceso de limpieza y pesaje para conocer la perdida de material en volumen.

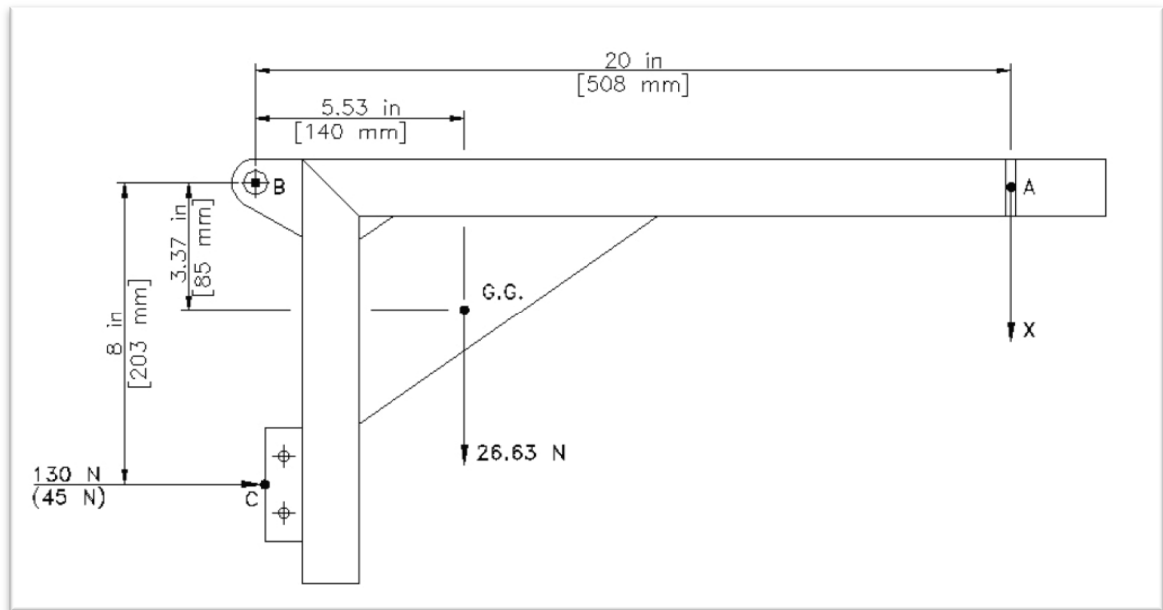
El volumen se calcula a partir del peso perdido por la probeta y de la densidad del material que la compone.

#### 4 CALCULOS DE DISEÑO

En la realización de los cálculos necesarios para la construcción de la maquina se utilizó la teoría de resistencia de materiales.

Cálculo para determinar la masa requerida para ejercer la presión necesaria sobre la probeta. Primero determinamos cuanto peso es necesario para ejercer una fuerza de 130N [1].

**Figura 18** Diagrama de cuerpo libre del brazo mecánico.



$$\sum_B M^{\uparrow+} = 0$$

$$[(X)(0.508m)] = [(130N)(0.203m)] - [(26.634N)(0.140m)]$$

$$X = \frac{(26.39Nm - 3.729Nm)}{0.508m}$$

$$X = 44.608N$$

Sabiendo que:  $F = ma$

$$m = \frac{44.608N}{9.81 \frac{m}{s^2}} \rightarrow m = 4.547Kg$$

Repetimos el procedimiento para determinar cuánto peso es necesario para ejercer una fuerza de 45N [1].

$$\sum_B M^{\uparrow+} = 0$$

$$[(X)(0.508m)] = [(45N)(0.203m)] - [(26.634N)(0.140m)]$$

$$X = \frac{(9.135Nm - 3.729Nm)}{0.508m}$$

$$X = 10.642N$$

Sabiendo que:  $F = ma$

$$m = \frac{10.642N}{9.81 \frac{m}{s^2}} \rightarrow m = 1.085Kg$$

Cálculo para determinar las poleas y las bandas necesarias para hacer la reducción de revoluciones.

Datos de entrada:

Distancia entre centros estimada (c): 15 pul

Factor de servicio (Fs): 1.1

Potencia nominal (Pn): 1.2 HP

Potencia de diseño (Pd): (Fs\*Pn) 1.32 HP

$$rpm_E = 250$$

$$rpm_S = 200 \pm 10$$

$$Relación\ de\ velocidad = \frac{250}{200 \pm 10} \rightarrow Rv = entre\ 1.19\ y\ 1.31$$

Diámetro polea conductora: 4.12"

Diámetro polea conducida: 5"

Cálculo de la velocidad de la polea pequeña:

$$V = r\omega = \pi nd \tag{17}$$

$$V = \pi(250)(4.12) \rightarrow V = 3235.84 \frac{pul}{min} * \frac{1pie}{12pul} \rightarrow V = 269.65 \frac{pie}{min}$$



Y como  $269.65 \frac{pie}{min} < 6500 \frac{pie}{min}$  que es la velocidad límite para estas poleas continuamos con esta combinación de poleas.

Longitud inicial de la banda (L):

$$L = 2c + \frac{\pi}{2}(D + d) + \frac{(D - d)^2}{4c} \quad (18)$$

$$L = 44.34pul$$

Seleccionamos la correa 3vx450 = 45 pul

Distancia modificada entre centros (C):

$$C = \frac{1}{4} \left( L - \pi \frac{D + d}{2} \right) \left\{ 1 + \left[ 1 - \frac{2(D - d)^2}{\left( L - \pi \frac{D + d}{2} \right)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (19)$$

$$C = 15.95pul$$

Correas necesarias para la transmisión:

$$\frac{HP}{Banda} = \left\{ \tilde{n}dp \left[ k_1 - \frac{k_2}{dp} - k_3(\tilde{n}dp)^2 - k_4 \log(\tilde{n}dp) \right] + k_{sr} \tilde{n} \right\} Gb \quad (20)$$

$$\frac{HP}{Banda} = \left\{ 0.2 * 4.07 \left[ 1.1691 - \frac{1.5295}{4.07} - 1.5229 * 10^{-4} (0.25 * 4.07)^2 - 0.1596 \log(0.25 * 4.07) \right] + 0.0944 * 0.25 \right\} 0.992 * 0.94$$

$$\frac{HP}{Banda} = 1.7 \approx 2$$

Se requieren 2 bandas con poleas de doble canal.

Cálculo del eje de transmisión

Material: Acero AISI 1045 C.R.

Sy: 77 kpsi (531 Mpa)

Su: 91 kpsi (627 Mpa)

Sn: 34 kpsi (234 Mpa)

$$T = \frac{(63000)(1.2)}{206} \rightarrow T = 367lb * pul$$

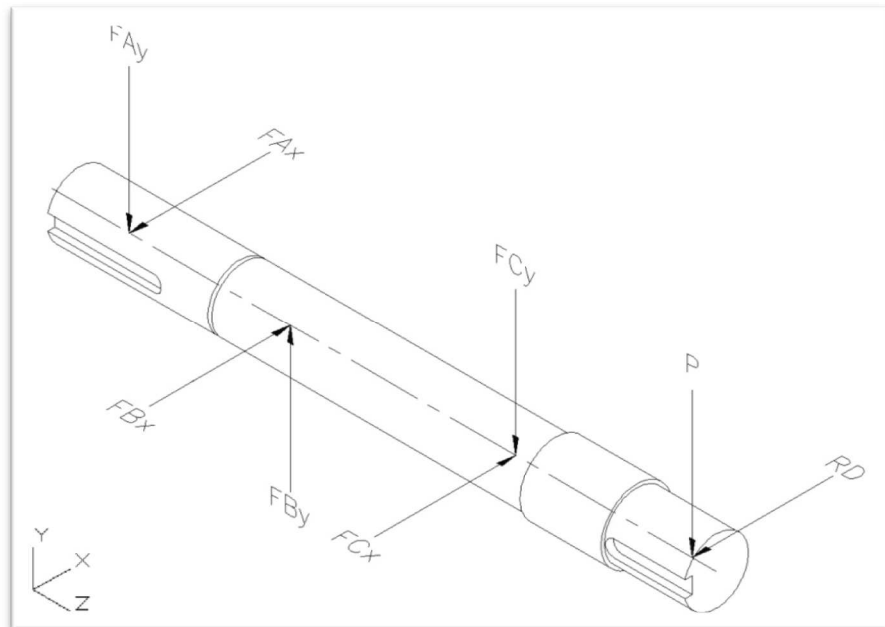
Fuerza en el eje debido al torque del motor

$$F = \frac{1.5 * T}{\frac{D}{2}} \tag{21}$$

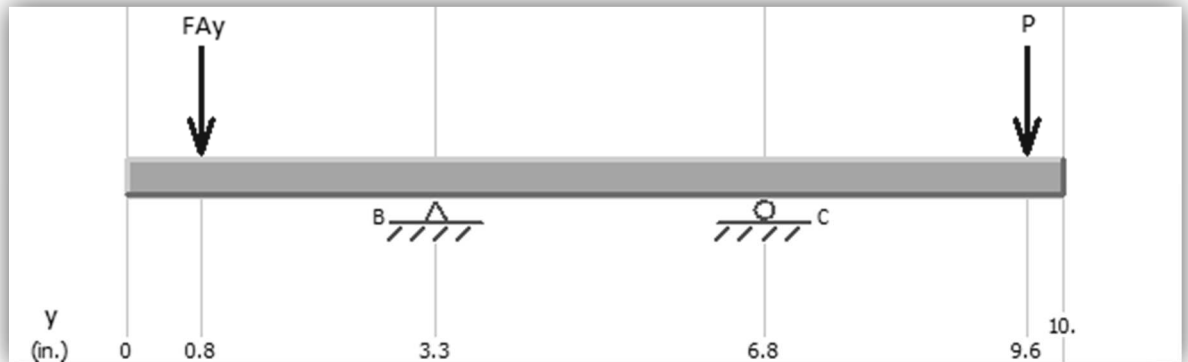
$$F = \frac{1.5 * 367lb * pulg}{2.5pulg} \rightarrow F = 220.2lb$$

Para determinar el diámetro del eje se usó el software libre MS Solid.

**Figura 19** Diagrama de cuerpo libre del eje de transmisión.



**Figura 20** Representación de las fuerzas que actúan en el plano y-z.



$$\sum_{By} M^{\uparrow+} = 0$$

$$FAy(2.5) - FCy(3.5) - P(6.3) = 0$$

$$FCy = 138.47 \text{ lbf}$$

$$\sum Fy^{\uparrow+} = 0$$

$$-FAy + FBy - FCy - P = 0$$

$$FBy = 357.67 \text{ lbf}$$

**Figura 21** Representación de las fuerzas que actúan en el plano x-z.



$$\sum_{Bx} M^{\uparrow+} = 0$$

$$FAx(2.5) + FCx(3.5) - RD(6.3) = 0$$

$$FCx = 12.03 \text{ lbf}$$

$$\sum Fx^{\uparrow+} = 0$$

$$-FAx + FBx + FCx - RD = 0$$

$$FBx = 74.27 \text{ lbf}$$

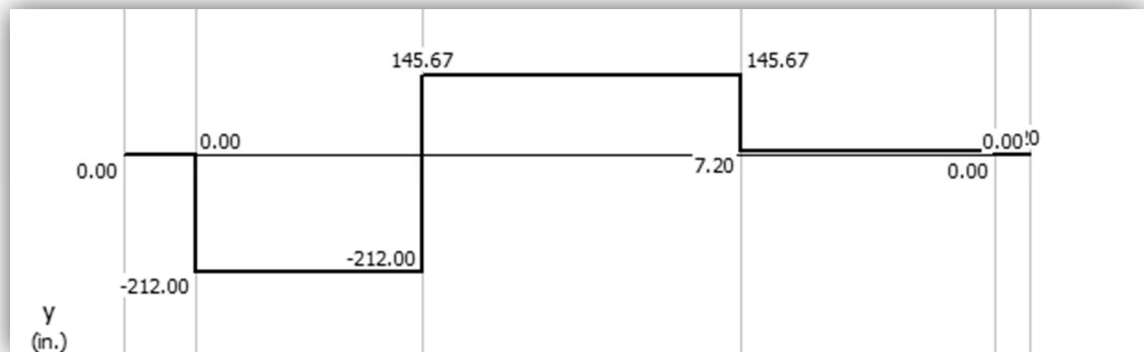
$$FAy = 212 \text{ lbf} \quad FAx = 57 \text{ lbf}$$

$$FBy = 357.67 \text{ lbf} \quad FBx = 74.27 \text{ lbf}$$

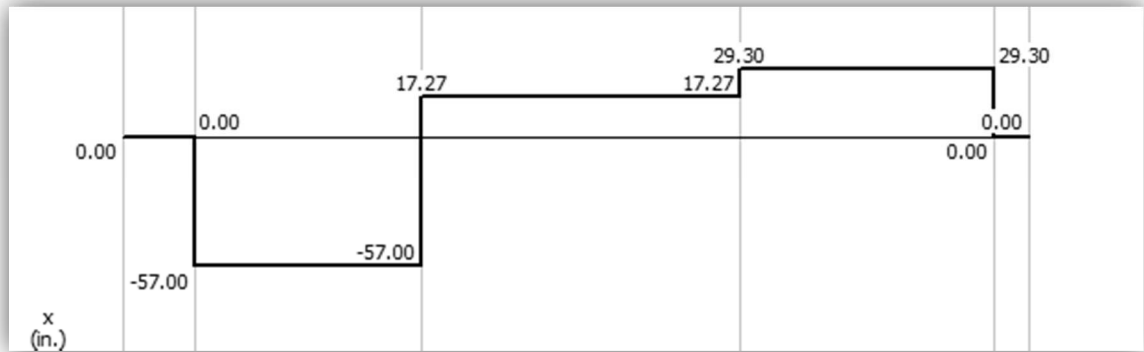
$$FCy = 138.47 \text{ lbf} \quad FCx = 12.03 \text{ lbf}$$

$$P = 7.2 \text{ lbf} \quad RD = 29.3 \text{ lbf}$$

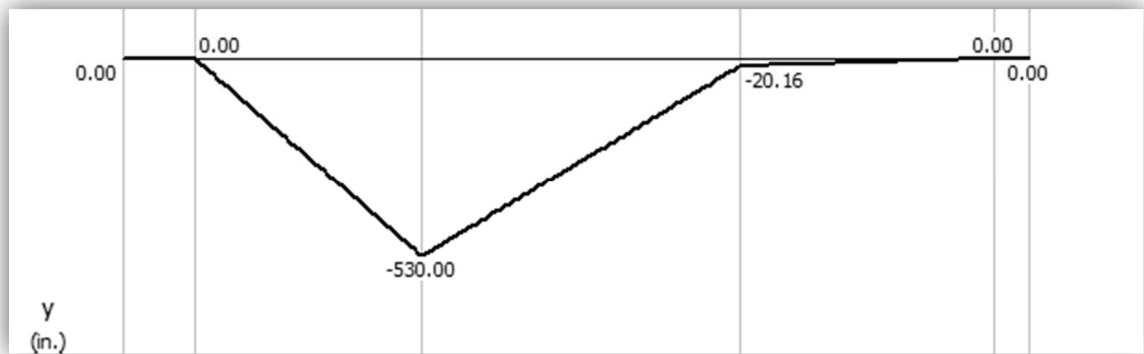
**Figura 22** Diagrama de cortante en el plano y-z.



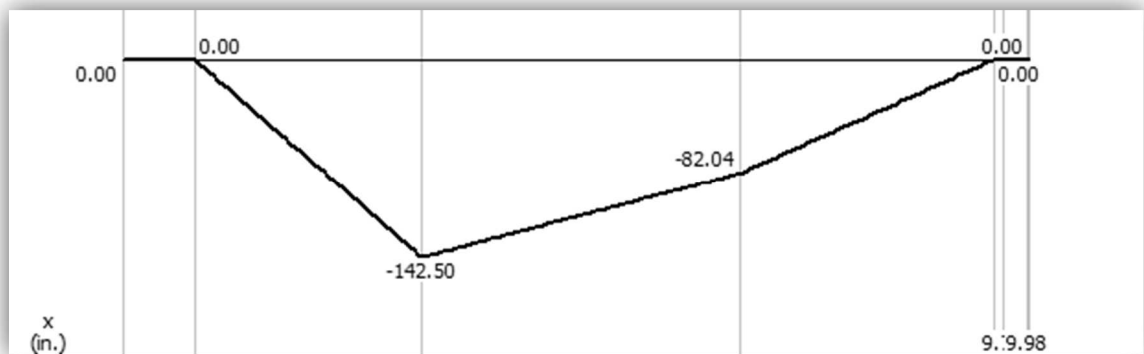
**Figura 23** Diagrama de cortante en el plano x-z.



**Figura 24** Diagrama de momento en el plano y-z.



**Figura 25** Diagrama de momento en el plano x-z.



$$M_B = \sqrt{(My)^2(Mx)^2} \quad (22)$$

$$M_B = \sqrt{(530)^2(142.5)^2}$$

$$M_B = 549 \text{ lbf} * \text{pul}$$

$$S'_n = S_n * C_S * C_R \quad (23)$$

$$C_S = 0.9 \quad C_R = 0.81$$

$$S'_n = 34 \text{ kpsi} * 0.9 * 0.81$$

$$S'_n = 24786 \text{ psi}$$

$$D = \left[ \frac{32N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{Kt(M)}{S'_n}\right)^2 + \frac{3}{4}\left(\frac{T}{S_y}\right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (24)$$

$$D = \left[ \frac{32(3)}{\pi} \sqrt{\left(\frac{1.5(549)}{24786}\right)^2 + \frac{3}{4}\left(\frac{367}{77000}\right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D = 1''$$

Cálculo de las cuñas

Longitud de la cuña

$$L = \frac{4T}{\sigma_d DH} \quad (25)$$

$$\sigma_d = \frac{S_y}{N} \quad (26)$$

$$L = \frac{4(367 \text{ lb} * \text{pul})}{25.6 \text{ kpsi} * 1 \text{ pul} * 0.25 \text{ pul}}$$

$$L = 0.223 \text{ pul}$$

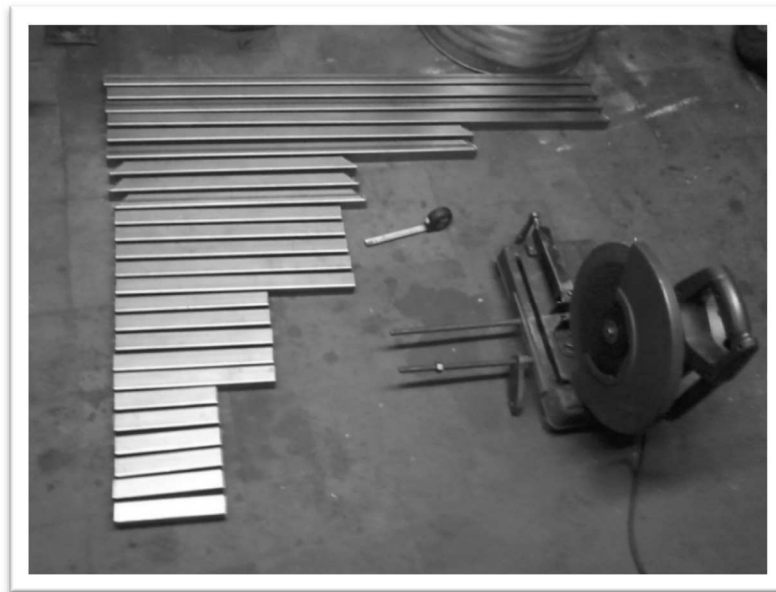
## 5 FABRICACION

Los componentes de la maquina se fabricaron en un pequeño taller de metal mecánica ubicado en la zona industrial de Puente Aranda, este taller cuenta con el equipamiento mínimo necesario para la fabricación que es: torno, fresadora, equipo de soldadura TIG, segueta sinfín, cortador orbital, taladro, pulidora, además de implementos básicos como banco de trabajo, prensa, caballetes, instrumentos de medida y trazado y demás herramienta manual.

Elementos e insumos como: moto reductor, poleas, correas de transmisión, rodamientos, cuenta revoluciones, botones de mando, contactores, cables, tornillos etc. Fueron adquiridos en almacenes del sector.

A continuación se hace una breve descripción del proceso de fabricación de algunos de los elementos de la máquina.

**Figura 26** Elementos para la estructura de soporte.



La estructura que soporta los diferentes elementos y equipos de la maquina se construyó a partir de tubo cuadrado de 1.5" en acero ASTM a-36 cal 18 . Ver plano N° MDA-001.

**Figura 27** Estructura de soporte.



Apuntado de la estructura con soldadura eléctrica, se usó cinta métrica y escuadra para garantizar que todos los diferentes elementos que la componen queden ortogonales entre ellos.



**Figura 28** Estructura armada.



Estructura armada lista para aplicar cordones de soldadura. Ver plano N° MDA-002

**Figura 29** Boquilla dosificadora.



La boquilla dosificadora para la arena se fabricó a partir de una barra de acero 1020  $\text{Ø}3/4''$  y dos láminas de acero A-36. Para unir estas piezas se utilizó el proceso de soldadura TIG. Ver plano N° MDA-003.

**Figura 30** Soporte para el moto reductor.



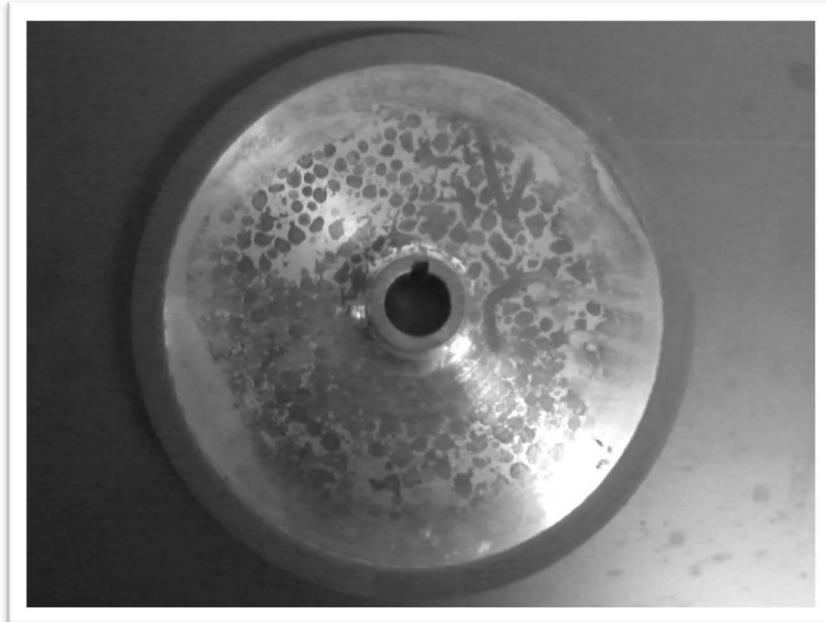
En la fabricación del soporte del moto reductor se empleó una lámina de acero A-36 de espesor de 1/4". Para lograr el pliegue que este debe tener se usó una dobladora. Para maquinar las perforaciones con que el soporte cuenta se usó una fresadora de torreta. Ver plano N° MDA-004.

**Figura 31** Eje de transmisión.



En su fabricación se utilizó un redondo de acero AISI 1045, para darle las dimensiones adecuadas se empleó un torno paralelo y para maquinar los cuñeros se empleó la fresadora de torreta. Ver plano N° MDA-005.

**Figura 32** Disco encauchetado.



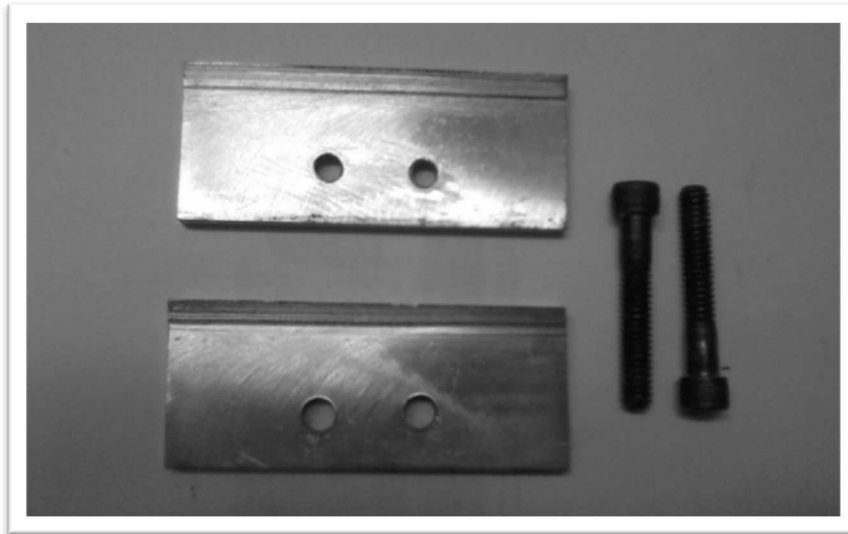
Fabricado en acero AISI 1020, para lograr la geometría requerida se utilizó un torno paralelo, y un cepillo vertical para hacer el cuñero, una vez maquinado, se recubrió con caucho chlorobutyl Ver plano N° MDA-006.

**Figura 33** Brazo mecánico.



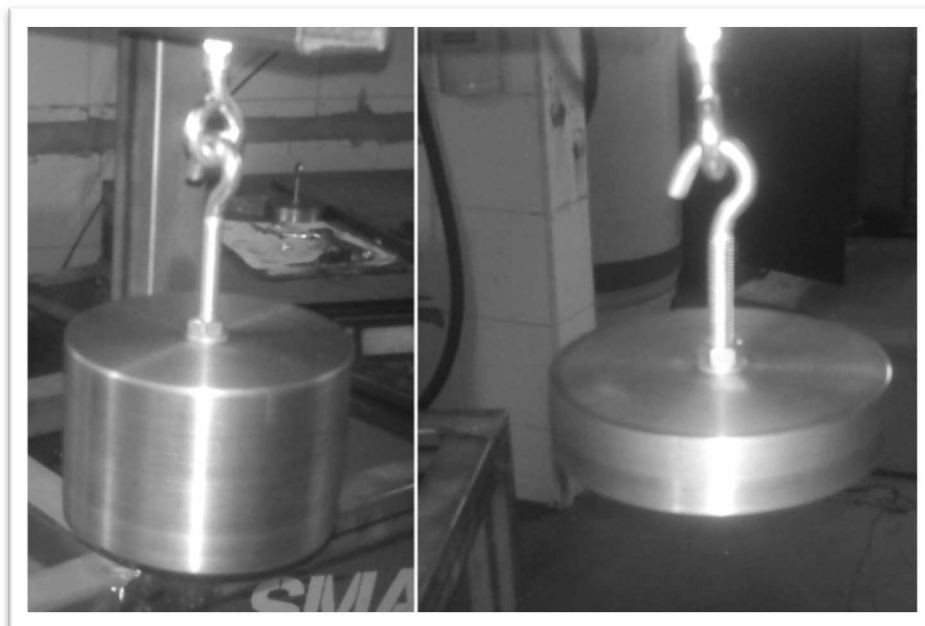
Fabricado en tubo cuadrado de 1.5" cal 18, lámina de esp. 1/4", lámina esp. 3/8", barra cuadrada de 1". Para su elaboración se utilizó el proceso de soldadura TIG. Ver plano N° MDA-007.

**Figura 34** Mordazas para sujeción de la probeta.



Fabricadas en platina AISI 1020, para su fabricación se usó una fresadora de torreta, a una se le hicieron agujeros pasantes y a la otra, agujeros roscados, posterior se realizó un recubrimiento antioxidante con zinc. Ver plano N° MDA-007.

**Figura 35** Pesos.



Para su elaboración se empleó acero 1020 Ø3". Para lograr las dimensiones que estos deben tener se usó un torno paralelo, los pesos en su conjunto completo, con gancho y contra tuerca, deben tener una masa de: 4547 gr y 1085 gr.

**Figura 36** Ensamble general.



En la figura 36, se observan los principales elementos que componen la máquina, ensamblados para verificar su adecuado funcionamiento.

## 6 ADECUACIÓN DE VARIABLES

Para lograr el correcto funcionamiento de la máquina de desgaste abrasivo, se deben adecuar las siguientes variables:

- Velocidad del disco con recubrimiento de caucho.
- Flujo de la arena a través de la boquilla dosificadora.
- Fuerza sobre la probeta.
- Dureza y diámetro del recubrimiento de caucho.
- Humedad, tamaño y forma del abrasivo.

### 6.1 VELOCIDAD DEL DISCO CON RECUBRIMIENTO DE CAUCHO.

La norma ASTM G-65, define que la velocidad del disco debe ser  $200 \pm 10$  rpm bajo carga [1], para lograr esta velocidad se usó un motorreductor con una potencia de 1.2 HP, 250 Nm de torque y 250 rpm de salida, para hacer la reducción utilizamos 2 poleas con bandas. Realizando un ensayo con el procedimiento B (130N y 2000 vueltas), y con la ayuda del cuentarrevoluciones, se obtuvo una velocidad rotacional del disco de 203 rpm, esta es una velocidad que está dentro del rango permitido.

### 6.2 FLUJO DE LA ARENA A TRAVÉS DE LA BOQUILLA DOSIFICADORA.

Controlando esta variable se asegura que la zona de la probeta donde se va a producir el desgaste se encuentra rodeada de partículas abrasivas, según la norma, el flujo de arena debe ser de entre 300 y 400 gr/min [1], para verificar esto se tomaron 10 muestras, dejando correr la arena durante 1 minuto, para luego pesarla se obtuvieron los siguientes datos:

**Tabla 2** Datos flujo de arena.

MUESTRA	FLUJO (gr/min)
1	337,96
2	329,06
3	335,76
4	333,5
5	328,98
6	331,42
7	336,94
8	338,05
9	329,56
10	337,28
MEDIA:	333,85

### 6.3 FUERZA SOBRE LA PROBETA.

Para la calibración de la fuerza que la maquina debe ejercer sobre la probeta se usó un resorte de 40 mm de longitud, el cual se cargó con un peso de 13.2 Kg que genera la fuerza de 130 N. El resorte se elonga hasta una longitud de 150 mm.

Para comprobar que el peso que se calculó teóricamente, ejerce la fuerza requerida en la probeta, se sujetó un extremo del resorte a la mordaza que agarra la probeta en el brazo mecánico, y el otro extremo por medio de una varilla rocada y un soporte a la estructura, una vez hecho esto se carga el brazo mecánico con el peso de 4547 gr. Y se observa que el resorte se elonga hasta una longitud de 150.5 mm. Como la diferencia entre la medida del resorte cargado con el peso conocido, y la medida del resorte cargado con el peso obtenido teóricamente, tienen una diferencia de tan solo 0.5 mm, se considera que la fuerza ejercida sobre la probeta está dentro del valor indicado en la norma ASTM G-65.

### 6.4 DUREZA Y DIÁMETRO DEL RECUBRIMIENTO DE CAUCHO.

Según la norma ASTM G-65, la dureza del caucho que recubre el disco, debe ser 60 shore A, con una tolerancia de  $\pm 2$  [1]. Esta dureza específica es importante porque el caucho tiene la función de presionar la arena contra la probeta, sin causar mayor daño en las partículas abrasivas.

Para medir la dureza del caucho se eligen cuatro puntos equidistantes y en su periferia, tal como se describe en la norma, los datos obtenidos en esta medición se presentan en la tabla 3.

**Tabla 3** Dureza del recubrimiento de caucho.

PUNTO	DUREZA (SHORE A)
1	60
2	62
3	61
4	60
MEDIA:	60,75

El diámetro del disco metálico en conjunto con el recubrimiento de caucho debe ser de 9 pulgadas, y puede ser utilizado hasta cuando el caucho se desgaste 0.25 pulgadas es decir hasta cuando el diámetro total sea de 8.5 pulgadas, cuando esto ocurra se debe cambiar el recubrimiento de caucho por otro de iguales características en cuanto a dureza y diámetro.

### 6.5 FORMA, TAMAÑO Y HUMEDAD DEL ABRASIVO.

El abrasivo debe ser del tipo arena sílice o cuarzo de forma redondeada de granulometría 50/70 según la AFS (American Foundry Sand), el contenido de humedad no podrá ser mayor al 0.5% en peso, ya que un porcentaje mayor de



humedad puede afectar los resultados de la prueba. El contenido de humedad se puede determinar mediante la medición de la pérdida de peso después de calentar una muestra de arena a aproximadamente 120 °C, durante 1 hora mínimo. Si el porcentaje de humedad es superior al 0.5% se debe repetir el procedimiento hasta alcanzar el porcentaje requerido por la norma. En zonas de alta humedad, la arena debe ser almacenada en un recipiente en el que se pueda controlar la temperatura y la humedad, un recipiente como el que se usa para almacenar electrodos para soldadura eléctrica puede ser útil.

No es recomendable reusar la arena, ya que esto puede afectar los resultados de la prueba.

Si es necesario cernir la arena sílice para obtener la granulometría requerida, se debe hacer pasar primero por un tamiz AFS 50 (300  $\mu$ ) con un porcentaje de retención del 5% y luego por un tamiz AFS 70 (212  $\mu$ ) con un porcentaje de retención del 95%.

Para calcular el porcentaje de humedad de la arena se pesaron 5 muestras cada una de aproximadamente 150 gramos, se calentó cada una a 120 °C durante 60 minutos, posterior a esto se pesaron para conocer el porcentaje de humedad, los datos obtenidos se muestran en la tabla 4.

**Tabla 4** porcentaje de humedad del abrasivo.

MUESTRA	PESO INICIAL (gr)	PESO FINAL (gr)	PESO PERDIDO (gr)	% DE HUMEDAD
1	150,00	149,90	0,10	0,07
2	150,10	149,85	0,25	0,17
3	149,95	149,50	0,45	0,30
4	150,05	149,70	0,35	0,23
5	150,00	149,50	0,50	0,33

## 7 PRUEBAS

Para realizar las pruebas de resistencia al desgaste se usaron probetas de acero AISI 1020, de 3" de largo por 1" de ancho por 3/8" de espesor (79.2 mm X 25.4 mm X 9.5 mm) [1]. En total se ensayaron 10 probetas, 4 con tratamiento térmico, 4 con recubrimiento por metalizado en frio y 2 sin ningún tipo de tratamiento o recubrimiento, según se relaciona en la tabla 5.

**Tabla 5** Características físicas de las probetas.

PROBETA	MATERIAL	TRATAMIENTO TÉRMICO Ó RECUBRIMIENTO ESPECIAL	DUREZA (HRC)
1	AISI 1020	NINGUNO	30
2		NINGUNO	
3		CEMENTADO	40
4		CEMENTADO	
5		METALIZADO 60	43
6		METALIZADO 60	
7		METALIZADO 6097	54
8		METALIZADO 6097	
9		TEMPLE	60
10		TEMPLE	

Previo a la realización de los ensayos las probetas fueron preparadas de acuerdo a lo recomendado en la norma ASTM G-65, esta preparación consiste en lavar con agua y jabón cada una de las probetas, posterior a esto se limpian con alcohol y luego se secan con aire caliente. Este proceso se hace para eliminar contaminantes y cualquier rastro de humedad que pueda permitir que las partículas abrasivas se adhieran a la superficie.

El procedimiento B fue el escogido para la realización del ensayo en las probetas con tratamiento térmico y metalizado, para las probetas sin tratamiento empleamos el procedimiento C, ya que son los indicados para probar materiales que sobrepasan los 100 mm<sup>3</sup> de volumen perdido.

Para obtener el peso de las probetas se usó una gramera marca MH-200 con capacidad para pesar hasta 200 gr con una precisión de 0.01 gr.

A continuación se muestran las tablas con los datos obtenidos en el ensayo de cada una de las probetas.

**Tabla 6** Resultado del ensayo en la probeta 1.

PROCEDIMIENTO ASTM G-65	C		
DESCRIPCION DEL MATERIAL	ACERO AISI 1020	DIÁMETRO DEL DISCO (mm)	225.45
TRATAMIENTO TÉRMICO	N.A.	ESPESOR DEL DISCO (mm)	12.7
DUREZA	30 HRC	DUREZA DEL CAUCHO (SHORE A)	60
PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE	N.A.		
PRUEBA N°	1		
CARGA USADA	130 N		
VUELTAS DEL DISCO	100		
FLUJO DE ARENA (gr/min)	334.00		
MASA INICIAL (gr)	138.18		
MASA FINAL (gr)	138.05		
MASA PERDIDA (gr)	0.13		
DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )	7.85		
VOLUMEN PERDIDO (mm <sup>3</sup> )	16.56		

**Tabla 7** Resultado del ensayo en la probeta 2.

PROCEDIMIENTO ASTM G-65	C		
DESCRIPCION DEL MATERIAL	ACERO AISI 1020	DIÁMETRO DEL DISCO (mm)	225.45
TRATAMIENTO TÉRMICO	N.A.	ESPESOR DEL DISCO (mm)	12.7
DUREZA	30 HRC	DUREZA DEL CAUCHO (SHORE A)	60
PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE	N.A.		
PRUEBA N°	2		
CARGA USADA	130 N		
VUELTAS DEL DISCO	100		
FLUJO DE ARENA (gr/min)	334.00		
MASA INICIAL (gr)	138.25		
MASA FINAL (gr)	138.08		
MASA PERDIDA (gr)	0.17		
DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )	7.85		
VOLUMEN PERDIDO (mm <sup>3</sup> )	21.66		

**Tabla 8** Resultado del ensayo en la probeta 3.

PROCEDIMIENTO ASTM G-65	B		
DESCRIPCION DEL MATERIAL	ACERO AISI 1020	DIÁMETRO DEL DISCO (mm)	225.45
TRATAMIENTO TÉRMICO	CEMENTADO	ESPESOR DEL DISCO (mm)	12.7
DUREZA	40 HRC	DUREZA DEL CAUCHO (SHORE A)	60
PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE	RECTIFICADO		
PRUEBA N°	3		
CARGA USADA	130 N		
VUELTAS DEL DISCO	2000		
FLUJO DE ARENA (gr/min)	334.00		
MASA INICIAL (gr)	143.52		
MASA FINAL (gr)	141.41		
MASA PERDIDA (gr)	2.11		
DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )	7.81		
VOLUMEN PERDIDO (mm <sup>3</sup> )	269.96		

**Tabla 9** Resultado del ensayo en la probeta 4.

PROCEDIMIENTO ASTM G-65	B		
DESCRIPCION DEL MATERIAL	ACERO AISI 1020	DIÁMETRO DEL DISCO (mm)	225.45
TRATAMIENTO TÉRMICO	CEMENTADO	ESPESOR DEL DISCO (mm)	12.7
DUREZA	40 HRC	DUREZA DEL CAUCHO (SHORE A)	60
PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE	RECTIFICADO		
PRUEBA N°	4		
CARGA USADA	130 N		
VUELTAS DEL DISCO	2000		
FLUJO DE ARENA (gr/min)	334.00		
MASA INICIAL (gr)	143.54		
MASA FINAL (gr)	141.39		
MASA PERDIDA (gr)	2.15		
DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )	7.78		
VOLUMEN PERDIDO (mm <sup>3</sup> )	276.49		

**Tabla 10** Resultado del ensayo en la probeta 5.

PROCEDIMIENTO ASTM G-65	B		
DESCRIPCION DEL MATERIAL	ACERO AISI 1020	DIÁMETRO DEL DISCO (mm)	225.45
TRATAMIENTO TÉRMICO	METALIZADO 60	ESPESOR DEL DISCO (mm)	12.7
DUREZA	43 HRC	DUREZA DEL CAUCHO (SHORE A)	60
PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE	RECTIFICADO		
PRUEBA N°	5		
CARGA USADA	130 N		
VUELTAS DEL DISCO	2000		
FLUJO DE ARENA (gr/min)	334.00		
MASA INICIAL (gr)	159.18		
MASA FINAL (gr)	157.45		
MASA PERDIDA (gr)	1.73		
DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )	7.74		
VOLUMEN PERDIDO (mm <sup>3</sup> )	233.19		

**Tabla 11** Resultado del ensayo en la probeta 6.

PROCEDIMIENTO ASTM G-65	B		
DESCRIPCION DEL MATERIAL	ACERO AISI 1020	DIÁMETRO DEL DISCO (mm)	225.40
TRATAMIENTO TÉRMICO	METALIZADO 60	ESPESOR DEL DISCO (mm)	12.7
DUREZA	43 HRC	DUREZA DEL CAUCHO (SHORE A)	60
PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE	RECTIFICADO		
PRUEBA N°	6		
CARGA USADA	130 N		
VUELTAS DEL DISCO	2000		
FLUJO DE ARENA (gr/min)	334.00		
MASA INICIAL (gr)	159.30		
MASA FINAL (gr)	157.59		
MASA PERDIDA (gr)	1.71		
DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )	7.74		
VOLUMEN PERDIDO (mm <sup>3</sup> )	230.33		

**Tabla 12** Resultado del ensayo en la probeta 7.

PROCEDIMIENTO ASTM G-65	B		
DESCRIPCION DEL MATERIAL	ACERO AISI 1020	DIÁMETRO DEL DISCO (mm)	225.40
TRATAMIENTO TÉRMICO	METALIZADO 6097	ESPESOR DEL DISCO (mm)	12.7
DUREZA	54 HRC	DUREZA DEL CAUCHO (SHORE A)	60
PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE	RECTIFICADO		
PRUEBA N°	7		
CARGA USADA	130 N		
VUELTAS DEL DISCO	2000		
FLUJO DE ARENA (gr/min)	334.00		
MASA INICIAL (gr)	165.70		
MASA FINAL (gr)	164.43		
MASA PERDIDA (gr)	1.27		
DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )	7.76		
VOLUMEN PERDIDO (mm <sup>3</sup> )	165.93		

**Tabla 13** Resultado del ensayo en la probeta 8.

PROCEDIMIENTO ASTM G-65	B		
DESCRIPCION DEL MATERIAL	ACERO AISI 1020	DIÁMETRO DEL DISCO (mm)	225.40
TRATAMIENTO TÉRMICO	METALIZADO 6097	ESPESOR DEL DISCO (mm)	12.7
DUREZA	54 HRC	DUREZA DEL CAUCHO (SHORE A)	60
PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE	RECTIFICADO		
PRUEBA N°	8		
CARGA USADA	130 N		
VUELTAS DEL DISCO	2000		
FLUJO DE ARENA (gr/min)	334.00		
MASA INICIAL (gr)	159.88		
MASA FINAL (gr)	158.61		
MASA PERDIDA (gr)	1.27		
DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )	7.76		
VOLUMEN PERDIDO (mm <sup>3</sup> )	166.6		

**Tabla 14** Resultado del ensayo en la probeta 9.

PROCEDIMIENTO ASTM G-65	B		
DESCRIPCION DEL MATERIAL	ACERO AISI 1020	DIÁMETRO DEL DISCO (mm)	225.35
TRATAMIENTO TÉRMICO	TEMPLE	ESPESOR DEL DISCO (mm)	12.7
DUREZA	60 HRC	DUREZA DEL CAUCHO (SHORE A)	60
PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE	RECTIFICADO		
PRUEBA N°	9		
CARGA USADA	130 N		
VUELTAS DEL DISCO	2000		
FLUJO DE ARENA (gr/min)	334.00		
MASA INICIAL (gr)	143.57		
MASA FINAL (gr)	142.24		
MASA PERDIDA (gr)	1.33		
DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )	7.81		
VOLUMEN PERDIDO (mm <sup>3</sup> )	170.12		

**Tabla 15** Resultado del ensayo en la probeta 10.

PROCEDIMIENTO ASTM G-65	B		
DESCRIPCION DEL MATERIAL	ACERO AISI 1020	DIÁMETRO DEL DISCO (mm)	225.35
TRATAMIENTO TÉRMICO	TEMPLE	ESPESOR DEL DISCO (mm)	12.7
DUREZA	60 HRC	DUREZA DEL CAUCHO (SHORE A)	60
PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE	RECTIFICADO		
PRUEBA N°	10		
CARGA USADA	130 N		
VUELTAS DEL DISCO	2000		
FLUJO DE ARENA (gr/min)	334.00		
MASA INICIAL (gr)	143.66		
MASA FINAL (gr)	142.37		
MASA PERDIDA (gr)	1.29		
DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )	7.82		
VOLUMEN PERDIDO (mm <sup>3</sup> )	164.9		

Con los datos de dureza y volumen perdido de cada una de las probetas se generó la siguiente tabla

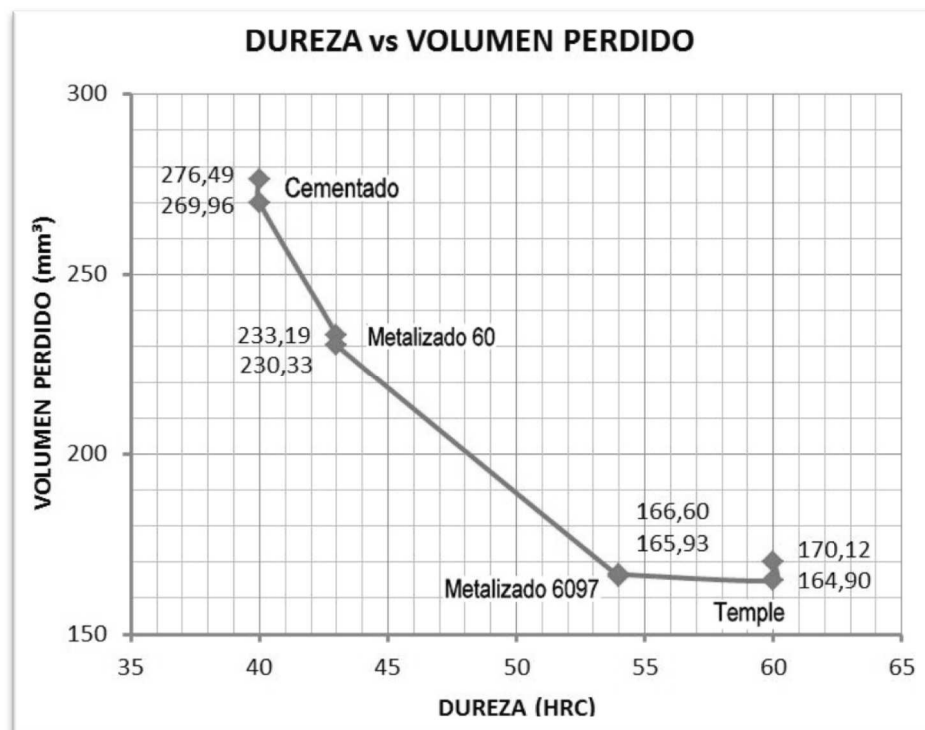
**Tabla 16** Resultados experimentales.

Tratamiento Térmico ó Recubrimiento especial	Dureza (HRC)	Procedimiento (según ASTM G65)	Peso inicial (gr)	Peso final (gr)	Peso perdido (gr)	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	Volumen perdido (mm <sup>3</sup> )
Cementado	40	B	143,52	141,41	2,11	7,81	269,96
Cementado		B	143,54	141,39	2,15	7,78	276,49
Metalizado 60	43	B	159,18	157,45	1,73	7,41	233,19
Metalizado 60		B	159,30	157,59	1,71	7,42	230,33
Metalizado 6097	54	B	165,70	164,43	1,27	7,65	165,93
Metalizado 6097		B	159,88	158,61	1,27	7,62	166,60
Temple	60	B	143,57	142,24	1,33	7,81	170,12
Temple		B	143,66	142,37	1,29	7,82	164,90

En la tabla 16 se agrupan los datos de las diferentes probetas a las que se le efectuaron el ensayo, en ella se puede observar que la pérdida de volumen, debida al desgaste aumenta conforme baja la dureza de la superficie de cada una de las probetas.

**Figura 37** Resultados experimentales en forma gráfica.

Volumen perdido para acero AISI 1020, con tratamiento térmico o recubrimiento metalizado.





## 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La norma ASTM G-65 especifica las variables que se deben controlar para lograr un adecuado diseño y asegurar la repetitividad de la prueba. La potencia del motor, las revoluciones del disco (distancia de deslizamiento), la fuerza sobre la probeta, el tamaño, la forma y la dureza del abrasivo, la dureza del recubrimiento del disco y el flujo del abrasivo, son determinantes para poder simular las condiciones que intervienen en el proceso de desgaste por abrasión y que ayuda a predecir el comportamiento de determinado material en una aplicación específica.

Los correctos procesos de fabricación y un estricto control en las tolerancias, se reflejan en un adecuado funcionamiento de la máquina.

Según los resultados obtenidos de los ensayos realizados con la máquina, la dureza del material influye de forma importante en la resistencia de este ante el desgaste por abrasión.

Las recomendaciones a tener en cuenta al realizar el ensayo son las siguientes:

Procurar posicionar la máquina en una superficie nivelada.

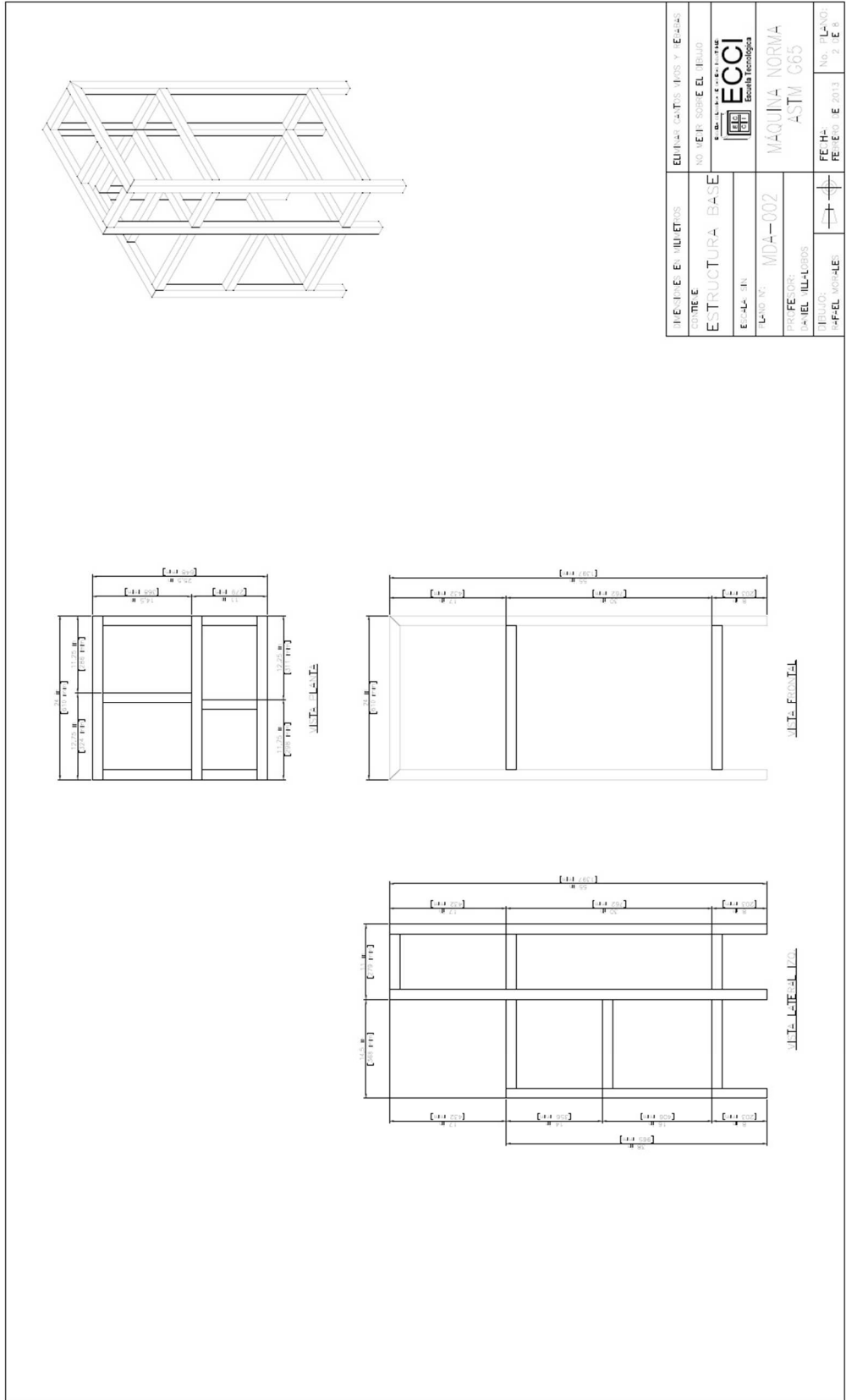
Al realizar la conexión a la alimentación eléctrica, se debe asegurar que el cable dispuesto para la conexión a tierra quede conectado correctamente, para garantizar que el contador de vueltas funcione adecuadamente.

La arena usada como abrasivo en el ensayo se debe almacenar en un recipiente plástico con tapa, esto para evitar que la arena se contamine con partículas extrañas que puedan ocasionar taponamientos en la boquilla dosificadora.

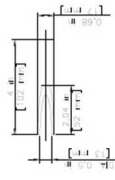
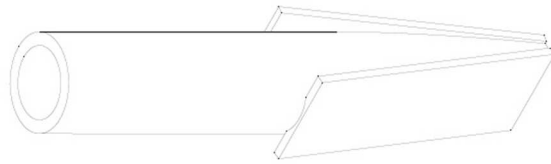
## 9 BIBLIOGRAFÍA

1. ASTM G 65 Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus. 2001.
2. BUDINSKI, Kenneth G. Guide to friction, wear, and erosion testing. 2007.
3. BAYER, Raymond. Mechanical wear prediction and prevention. New York, N.J. EEUU. 1994.
4. DAVIS, Joseph R. Surface engineering for corrosion and wear resistance. Materials Park, OH. 2001.
5. DEUTSCHMAN, Aaron D, MICHELS, Walter J, WILSON, Charles E. Diseño de máquinas teoría y práctica. Mexico. 1987.
6. TECNOLOGÍA DE LOS METALES, H. Appold, K. Feiler, A. Reinhard, P. Schmidt. Barcelona - España. (2005)
7. G. Tovar S.; Fundamentos del Análisis de Falla, Ed. Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá (2005).
8. KALPAKJIAN - SCHMID.; Manufactura, ingeniería y tecnología, México (2002).
9. KARL-HEINZ Zum Gahr; Microstructure and wear of materials, Países Bajos (1987)

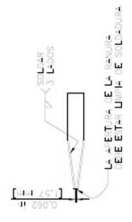




ITEM DE EJECUCION	ELEMENTOS Y MATERIALES
CONTENIDO	NO. DE BOLETINES Y PLANOS
ESTRUCTURA BASE	
ESPECIFICACIONES	ECCI Escuela Tecnológica
LABORATORIO	MAQUINA NORMA ASTM G65
PROFESOR	
ALUMNO	
FECHA	NÚMERO
REVISOR	FECHA
APROBADO	2013

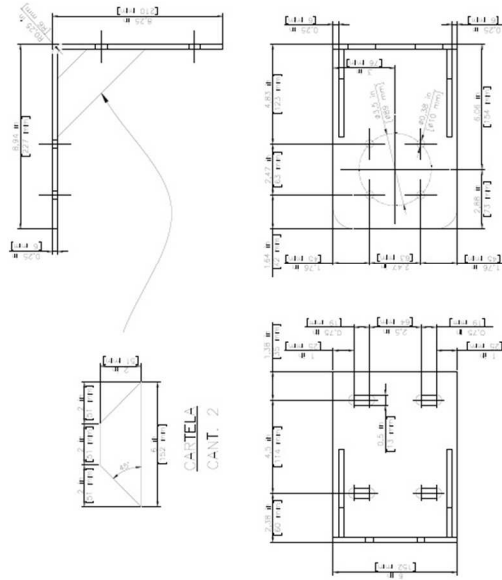


ITEM 01  
CANT. 1

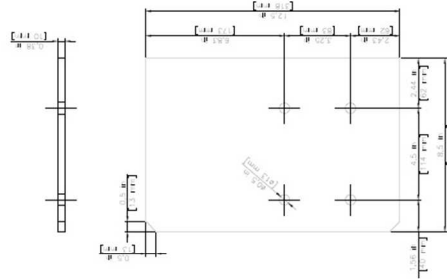


ITEM 02  
CANT. 2

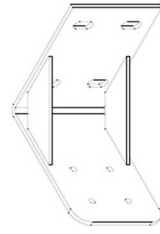
NO. DE DISEÑO	0302-0302-0302	NO. DE REV.	01	FECHA	2013
NO. DE PROYECTO	0302-0302-0302	NO. DE REV.	01	FECHA	2013
PROYECTO	UTILEJES	NO. DE REV.	01	FECHA	2013
CLIENTE	EDIFICIOS Y SISTEMAS	NO. DE REV.	01	FECHA	2013
BOQUILLA DOSIFICADORA		NO. DE REV.	01	FECHA	2013
ESCALA	1:1	NO. DE REV.	01	FECHA	2013
PROYECTADO POR	MDA-003	NO. DE REV.	01	FECHA	2013
REVISADO POR	MAQUINA NORMA	NO. DE REV.	01	FECHA	2013
APROBADO POR	ASTM G65	NO. DE REV.	01	FECHA	2013
PROYECTADO POR		NO. DE REV.	01	FECHA	2013
REVISADO POR		NO. DE REV.	01	FECHA	2013
APROBADO POR		NO. DE REV.	01	FECHA	2013



SOPORTE MOTORREDUCTOR  
material: Galpa 4-30 E=3/8"

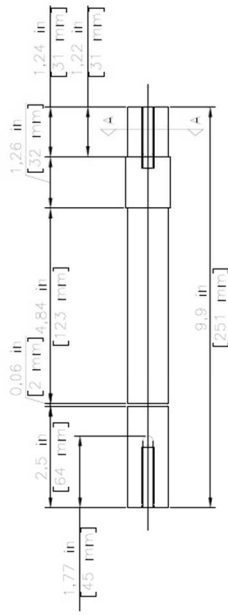


PLATA SOPORTE  
material: Galpa 4-30 E=3/8"

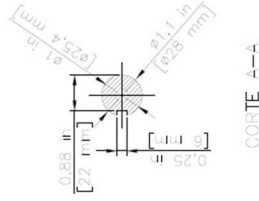


INSTRUMENTOS	ELIMINAR	ELIMINAR	ELIMINAR	ELIMINAR
CONTENEDOR	NO SE ENTREGA CON EL TIBUJO			
SOPORTE MOTORREDUCTOR				
ESCALA	E=1:1			
PLANO N°	MDA-004			
PROYECTO	MAQUINA NORMA			
TIBUJO	ASTM G65			
FECHA	No. PLANO: 4 DE 5			
MODIFICACIONES	FECHA: 2013			

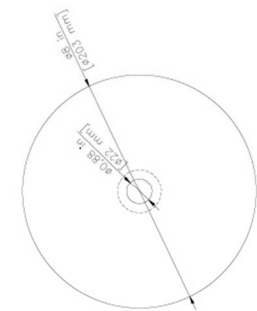




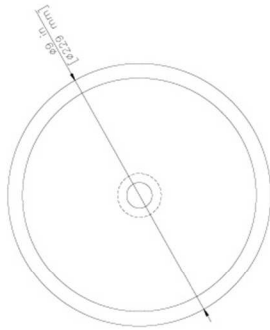
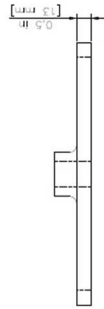
E-E



INSTRUMENTOS EN MILÍMETROS	ELIMINAR CANTOS VIVOS Y BILIAS
CONTIENE:	NO MEDIR SOBRE EL DIBUJO
E-E DE TRANSMISIÓN	 <b>ECCI</b> Escuela Tecnológica
ESCALA: SIN	MÁQUINA NORMA ASTM G65
PLANO N°: MDA-005	PROFESOR:
PAPEL MILÍMETROS	DIBUJO:
RAFEL MORALES	FECHA: FEBRERO 2013
	No. PLANO: 5 DE 8



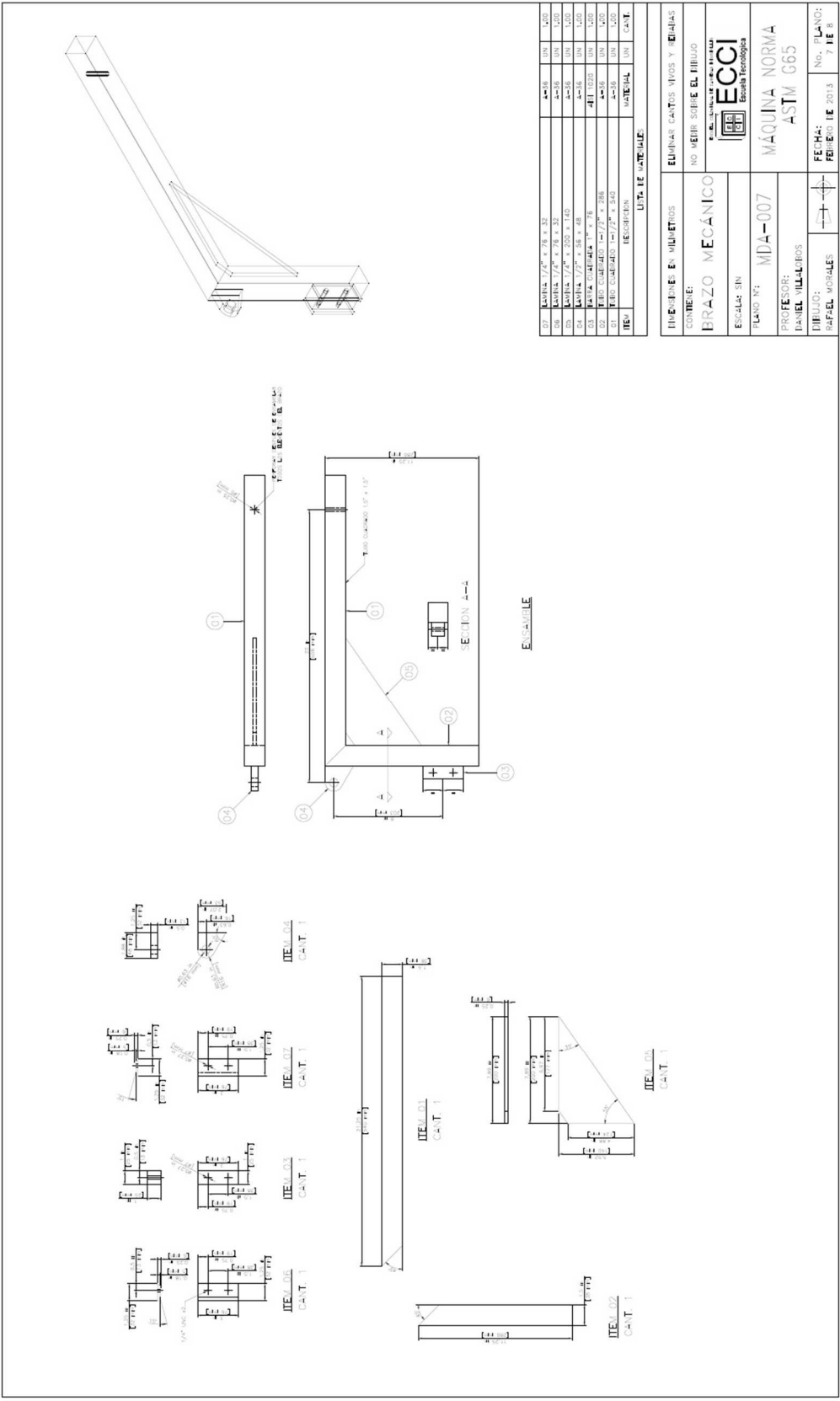
DISCO METALICO



DIMENSIONES FINALES DEL DISCO  
CON RECUBRIMIENTO DE CAUCHO  
La fuerza opera del cauchito. dibujos según norma 58 y 62. Material A

DIMENSIONES EN MILIMETROS	ELIMINAR CANTOS VIVOS Y REBORDAS
CONTIENE	NO VERER SOBRE EL DIBUJO
DISCO ENCAUCHETADO	<b>ECCI</b> EQUIPO DE CONTROL DE CALIDAD
ESCALA: SIN	
PLANO N°: MDA-006	MAQUINA NORMA ASTM G65
PROFESOR:	
DIBUJO:	
RAFAEL MORALE	FECHA: FEBRERO DE 2013
	No. PLANO: 6 DE 8





ITEM	DESCRIPCION	MATERIAL	UN.	CANT.
01	BARRA 1/2" x 7/8 x 32	A-308	UN.	1,000
02	BARRA 1/2" x 5/8 x 25	A-308	UN.	1,000
03	BARRA 1/2" x 5/8 x 48	A-308	UN.	1,000
04	BARRA 1/2" x 5/8 x 48	A-308	UN.	1,000
05	BARRA 1/2" x 5/8 x 48	A-308	UN.	1,000
06	BARRA 1/2" x 5/8 x 48	A-308	UN.	1,000
07	BARRA 1/2" x 5/8 x 48	A-308	UN.	1,000

LISTA DE MATERIALES	
DIMENSIONES EN MILIMETROS	ELIMINAR CANTOS VIVOS Y BORDAS
CONTIENE: BRAZO MECANICO	NO VEIR SOBRE EL DIBUJO
ESCALA: SIN	<b>ECCI</b> Escuela Tecnológica
PLANO N°: MDA-007	MÁQUINA NORMA ASTM G65
PROFESOR: DANIEL VILLALBA	
DIBUJO: RAFAEL MORALES	
FECHA: 7 DE FEBRERO DE 2013	No. PLANO: 7 DE 8