



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
MECÁNICO**

**TÍTULO DEL PROYECTO**

**“DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE LOS  
PARÁMETROS DEL ENSAYO DE DUREZA MEYER Y EL  
COMPORTAMIENTO ANTE EL DESGASTE ABRASIVO DE  
DIFERENTES METALES.”**

**REALIZADO POR: LUIS FELIPE ZAMBRANO MOYA**

**DIRECTOR: ING. VICTOR ANDRADE  
CODIRECTOR: ING. PATRICIO RIOFRÍO**

**SANGOLQUÍ, 2015**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE**

**INGENIERÍA MECÁNICA**

**CERTIFICACIÓN DE ELABORACIÓN DE PROYECTO**

El proyecto “**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS DEL ENSAYO DE DUREZA MEYER Y EL COMPORTAMIENTO ANTE EL DESGASTE ABRASIVO DE DIFERENTES METALES**” fue realizado en su totalidad por el Sr. LUIS FELIPE ZAMBRANO MOYA como requerimiento para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

---

**Ing. Víctor Andrade**

**DIRECTOR**

---

**Ing. Patricio Riofrío**

**CODIRECTOR**

Sangolquí, 2015

# UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE

## INGENIERÍA MECÁNICA

### DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo: Luis Felipe Zambrano Moya.

#### **DECLARO QUE:**

El proyecto de grado titulado: “**DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS DEL ENSAYO DE DUREZA MEYER Y EL COMPORTAMIENTO ANTE EL DESGASTE ABRASIVO DE DIFERENTES METALES**”, ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales a terceros, conforme los autores constan al final de cada párrafo correspondiente.

En virtud a esta declaración, me responsabilizo del contenido científico del proyecto de grado en mención.

---

Luis Felipe Zambrano Moya

100315562-7

Sangolquí, 2015

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE****INGENIERÍA MECÁNICA****AUTORIZACIÓN**

Yo: Luis Felipe Zambrano Moya.

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la institución del proyecto de grado titulado **“DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS DEL ENSAYO DE DUREZA MEYER Y EL COMPORTAMIENTO ANTE EL DESGASTE ABRASIVO DE DIFERENTES METALES”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

---

Luis Felipe Zambrano Moya

100315562-7

Sangolquí, 2015

## DEDICATORIA

*Dedico esta tesis realizada con gran ímpetu a mis padres, que mediante el apoyo constante e incondicional que me han brindado y los valores inculcados de perseverancia, constancia y veracidad me han permitido culminar este camino difícil pero muy reconfortante al finalizarlo de manera exitosa.*

*A mi familia que siempre me ha brindado su apoyo, su cariño y se ha preocupado por mí en todo momento de este largo camino que está culminando.*

*A mis buenos amigos y compañeros que han estado presente y me han acompañado en este proceso de formación académica y personal para llegar hacer un buen profesional y una persona de bien para la sociedad.*

*Luis Felipe Zambrano Moya*

## **AGRADECIMIENTO**

*Agradezco a mis directores el Ing. Víctor Andrade e Ing. Patricio Riofrío por su tiempo y dedicación al momento de ayudarme y brindarme los conocimientos necesarios para la elaboración y realización de este proyecto de tesis.*

*También agradezco al PhD. Leonardo Goyos por ayudarme con la elección del tema de tesis y el desarrollo en sí del proyecto. Además por toda la atención prestada y la dedicación para poder concluirlo de manera satisfactoria,*

*A la Carrera de Ingeniería Mecánica por todos los conocimientos, experiencias y enseñanzas que me han transmitido en el transcurso de esta etapa de mi vida. Y que han logrado formarme y prepararme adecuadamente para poder desempeñarme de una excelente manera como profesional.*

*A todos los señores laboratoristas, en especial Ing. Mosquera e Ing. Navas que me brindaron su apoyo, su ayuda y su supervisión para que esta tesis sea realizada de la mejor manera posible.*

*Luis Felipe Zambrano Moya*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN DE ELABORACIÓN DE PROYECTO .....	i
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD .....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS .....	xii
RESUMEN .....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
CAPÍTULO 1.....	1
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. ANTECEDENTES .....	1
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3. OBJETIVOS .....	2
1.3.1. GENERAL.....	2
1.3.1. ESPECÍFICOS .....	2
1.4. ALCANCE .....	3
1.5. JUSTIFICACIÓN .....	4
CAPÍTULO 2.....	5
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. ENSAYO DE DUREZA MEYER .....	5
2.1.1. DEFINICIÓN DE DUREZA.....	5
2.1.2. DUREZA MEYER.....	6
2.2. ENSAYO DE DESGASTE ABRASIVO.....	7
2.2.1. DEFINICIÓN DE DESGASTE .....	7
2.2.2. DEFINICIÓN DEL PROCESO DE DESGASTE ABRASIVO .....	10

2.2.3. EFECTOS SOBRE EL DESGASTE ABRASIVO .....	12
2.2.4. FORMAS DE MEDICION DEL DESGASTE .....	16
2.3. TIPOS DE ALEACIONES.....	18
2.3.1. ACERO.....	18
2.3.2. ALUMINIO .....	29
2.3.3. BRONCE .....	31
CAPÍTULO 3.....	32
3. METODOLOGIA DEL PROYECTO.....	32
3.1. METODOLOGÍA DEL ENSAYO DE DUREZA MEYER.....	32
3.1.1. ENSAYO DE DUREZA MEYER .....	32
3.1.2. MEDICIÓN DE LAS HUELLAS .....	33
3.2. METODOLOGÍA DEL ENSAYO DE DESGASTE ABRASIVO .....	34
3.3. DETERMINACIÓN DE LA RAZÓN DE ENDURECIMIENTO .....	
MEDIANTE EL ÍNDICE DE MEYER .....	38
3.3.1. ÍNDICE DE MEYER .....	38
3.3.2. CORRELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE MEYER “n”, CARGA.....	
MÍNIMA DE DEFORMACIÓN “Po” Y EL DESGASTE .....	40
3.4. METODOLOGÍA DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS.....	40
3.4.1. TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS .....	40
CAPÍTULO 4.....	43
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	43
4.1. RESULTADOS DEL ENSAYO DE DUREZA MEYER.....	43
4.1.1. MEDICIÓN HUELLAS DUREZA .....	43
4.1.2. RESULTADOS DUREZA .....	44
4.1.3. ÍNDICE DE MEYER Y CARGA MÍNIMA DE DEFORMACIÓN.....	45
4.2. RESULTADOS DEL ENSAYO DE DESGASTE ABRASIVO.....	50

4.2.1. MEDICIÓN HUELLAS DESGASTE.....	50
4.2.2. CÁLCULO DEL VOLUMEN DESGASTADO .....	52
4.2.3. VALIDACIÓN DE RESULTADOS .....	59
4.3. DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE LOS..... PARÁMETROS DE DUREZA MEYER Y EL DESGASTE ABRASIVO .....	62
4.3.1. COEFICIENTE DE DESGASTE.....	62
4.3.2. DUREZA VS DESGASTE ABRASIVO .....	64
CAPÍTULO 5.....	69
5. ANÁLISIS ECONÓMICO.....	69
5.1. COSTOS DIRECTOS.....	69
5.1.1. MANTENIMIENTO E IMPLEMENTACIÓN.....	69
5.1.2. DISEÑO E INGENIERÍA.....	69
5.1.3. ADQUISICIÓN DE MATERIALES .....	70
5.1.4. FABRICACIÓN DE ELEMENTOS.....	70
5.1.5. COSTOS DE ENSAYOS MECÁNICOS Y TRATAMIENTOS .....	
TÉRMICOS.....	71
5.2. COSTOS INDIRECTOS .....	71
5.2.1. SUMINISTROS Y SERVICIOS.....	71
5.2.2. ASESORAMIENTO .....	72
5.3. COSTOS TOTALES DEL PROYECTO.....	72
5.4. BENEFICIOS OBTENIDOS CON EL PROYECTO .....	72
CAPÍTULO 6:.....	73
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	73
6.1. CONCLUSIONES.....	73
6.2. RECOMENDACIONES .....	75
BIBLIOGRAFÍA.....	76

ANEXOS.....	77
ANEXO A.....	78
ANEXO B.....	79

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Comportamientos de desgaste [7] .....	9
Figura 2: Factores que afectan al desgaste [9] .....	10
Figura 3: Clasificación del desgaste abrasivo por el tipo de contacto [11]..	11
Figura 4: Mecanismos de desgaste abrasivo [7].....	12
Figura 5: Resistencia al desgaste en función de la dureza. [9].....	13
Figura 6: Coeficiente de desgaste en función del tamaño del abrasivo [9].	15
Figura 7: Volumen perdido de un perno [9].....	17
Figura 8: Bloque desgastado [9] .....	17
Figura 9: Efecto del contenido de carbono en la resistencia de los aceros ... [10].....	19
Figura 10: Efecto del contenido del carbono en la ductilidad de los aceros.... comunes [10] .....	20
Figura 11: Diagrama hierro-carbono. [12] .....	21
Figura 12: Efecto de la temperatura de revenido sobre las propiedades..... mecánicas de un acero SAE 1050 [13].....	28
Figura 13: Ensayo de dureza a la probeta de bronce .....	32
Figura 14: Probetas después de realizado el ensayo de dureza con las ..... diferentes cargas .....	33
Figura 15: Microscopio de Herramientas de apreciación 0,001mm .....	34
Figura 16: Máquina de desbaste.....	35
Figura 17: Probetas luego de realizado las perforaciones parciales tipo ..... avellanado .....	36
Figura 18: Balanza electrónica.....	37
Figura 19: Probetas y portaprobetas.....	38
Figura 20: Grafica log d vs log P del Acero 1018.....	46
Figura 21: Grafica log d vs log P del Acero 1045 Recocido .....	46
Figura 22: Grafica log d vs log P del Acero 1045 Revenido Bajo.....	47
Figura 23: Grafica log d vs log P del Acero 1045 Revenido Alto.....	47
Figura 24: Grafica log d vs log P del Acero DF2 .....	48

Figura 25: Grafica log d vs log P del Duraluminio .....	48
Figura 26: Grafica log d vs log P del Bronce.....	49
Figura 27: Gráfica tiempo vs volumen del Acero 1018 .....	55
Figura 28: Gráfica tiempo vs volumen del Acero 1045 Recocido .....	56
Figura 29: Gráfica tiempo vs volumen del Acero 1045 Revenido Bajo .....	56
Figura 30: Gráfica tiempo vs volumen del Acero 1045 Revenido Alto .....	57
Figura 31: Gráfica tiempo vs volumen del Acero DF2.....	57
Figura 32: Gráfica tiempo vs volumen del Duraluminio.....	58
Figura 33: Gráfica Volumen vs tiempo del Bronce.....	58
Figura 34: Correlación del Coeficiente de desgaste vs Índice de Meyer “n”	63
Figura 35: Correlación del Coeficiente de desgaste vs Carga Mínima de ..... Deformación "Po".....	63
Figura 36: Gráfica Dureza vs Desgaste del Acero 1018 .....	64
Figura 37: Gráfica Dureza vs Desgaste del Acero 1045 Recocido .....	65
Figura 38: Gráfica Dureza vs Desgaste del Acero 1045 Revenido Bajo....	65
Figura 39: Gráfica Dureza vs Desgaste del Acero 1045 Revenido Alto .....	66
Figura 40: Gráfica Dureza vs Desgaste del Acero DF2 .....	66
Figura 41: Gráfica Dureza vs Desgaste del Duraluminio .....	67
Figura 42: Gráfica Dureza vs Desgaste del Bronce .....	67
Figura 43: Correlación Dureza vs Desgaste .....	68

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Media Diámetros, Varianza y Desviación Estándar .....	43
Tabla 2: Resultados de Dureza.....	44
Tabla 3: Índice de Meyer "n" y Carga Mínima de deformación "Po" .....	49
Tabla 4: Media Diámetro Inicial, Varianza y Desviación Estándar .....	50
Tabla 5: Media Diámetro Final, Varianza y Desviación Estándar .....	51
Tabla 6: Volumen total desgastado con Diferencia de diámetros "x" .....	53
Tabla 7: Volumen total desgastado con Diferencia de Pesos "G" .....	54
Tabla 8: Comparación entre el método gravímetro y el geométrico.....	54
Tabla 9: Validación Desgaste teórico vs práctico.....	60
Tabla 10: Coeficiente de desgaste "K" y relación "r" .....	62
Tabla 11: Dureza vs Desgaste Abrasivo .....	64
Tabla 12: Costos de mantenimiento .....	69
Tabla 13: Tabla de costos de diseño e ingeniería.....	69
Tabla 14: Costos de materiales .....	70
Tabla 15: Costos de fabricación de elementos .....	70
Tabla 16: Costos de ensayos mecánicos y tratamientos térmicos.....	71
Tabla 17: Costos de suministros y servicios .....	71
Tabla 18: Costos de asesoramiento del proyecto .....	72
Tabla 19: Tabla de costos totales .....	72

## **RESUMEN**

El estudio del comportamiento de los metales frente al desgaste abrasivo ha buscado encontrar o establecer una forma simple de predecir aproximadamente la resistencia a este para poder solucionarlo o evitarlo, ya que el desgaste representa una de las principales pérdidas económicas en el sector mecánico. En el presente proyecto de tesis se realizó una investigación y se determinó algunas correlaciones existentes entre los parámetros de dureza y el desgaste abrasivo de diferentes metales. Para ello se usó una dureza no muy conocida denominada dureza Meyer que a pesar de ser similar a la dureza Brinell tiene la ventaja de que nos permiten obtener indicadores, no validados aún para el desgaste abrasivo, del coeficiente de endurecimiento por deformación medido por el índice de Meyer y de la plasticidad del material relacionado con carga mínima de deformación. También se realizaron ensayos de desgaste abrasivo con el fin de obtener información para determinar las correlaciones que nos permitieron predecir aproximadamente el comportamiento de los metales ensayados según las condiciones en los que estos se encuentren y según el tratamiento térmico que se les haya dado. Además se compararon métodos y datos teóricos o normados para el desgaste abrasivo frente a los que se realizaron prácticamente.

### **Palabras claves:**

- **DUREZA**
- **DESGASTE ABRASIVO**
- **COEFICIENTE DE ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN**
- **PLASTICIDAD**

## **ABSTRACT**

Studies of the behavior of metals against abrasive wear have sought to find a simple way to predict it and be able to fix it or avoid it. Wear is one of the biggest economic problems and losses in the mechanical sector. In this thesis project, we did an investigation to find some correlations between the hardness parameters and abrasive wear of different metals. It used an uncommon kind of hardness named Meyer hardness. It is similar to Brinell hardness but it has the advantage of being able to obtain indicators, not validated for abrasive wear yet, strain-hardening coefficient is measured by Meyer index and plasticity of the material is related to minimum yield strength. Some abrasive wear tests were also conducted to obtain information to determine the correlations. They enabled us to predict the behavior of metals tested according the conditions that work and the heat treatment they received. Theoretical and practical methods and data was compared each other.

### **Keywords:**

- **HARDNESS**
- **ABRASIVE WEAR**
- **STRAIN-HARDENING COEFFICIENT**
- **PLASTICITY**

# CAPÍTULO 1

## 1. GENERALIDADES

### 1.1. ANTECEDENTES

Los estudios del comportamiento de los materiales ante el desgaste han tomado diferentes vías tratando de establecer un indicador sencillo que permita predecir aproximadamente la resistencia al desgaste [1, 3]. Los intentos de correlacionar la dureza con el desgaste sólo han resultado exitosos de forma muy general [2].

Si bien la evaluación del coeficiente de endurecimiento por deformación se asocia al ensayo de tracción, es conocido [4-6] que a través del Índice de Meyer se puede lograr una evaluación indirecta del mismo [6].

El poder evaluar de forma sencilla la capacidad de endurecimiento del material resulta de gran ayuda para predecir el comportamiento ante el desgaste.

En 1908 E. Meyer propuso un ensayo de determinación de la resistencia a la penetración similar al Ensayo Brinell pero con un diferente método de evaluación de la dureza y ha demostrado una buena correlación con la curva de esfuerzo-deformación real. Este método presenta la característica de ser sensible a la variación de la carga, debido al endurecimiento por deformación del material. La ventaja que presenta este método es que esta variación es constante y creciente en sentido lineal, lo que no ocurre con el ensayo Brinell [6].

Mediante el ensayo de Meyer es posible evaluar la acritud del material por lo que el índice de Meyer parece un parámetro fácil de determinar y que refleja el comportamiento del material ante carga, siendo un indicador no validado del desgaste abrasivo.

## **1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

Aunque se han establecido diferentes relaciones entre la capacidad de endurecimiento de diferentes metales y su comportamiento ante el desgaste abrasivo, los ensayos generalmente son complejos de instrumentar [3]. El índice de Meyer es un parámetro fácil de determinar y que refleja el comportamiento del material ante carga, sin embargo no se ha validado para el desgaste abrasivo. Por lo cual se plantea determinar la validez del ensayo de dureza Meyer y sus parámetros para predecir este desgaste.

## **1.3. OBJETIVOS**

### **1.3.1. GENERAL**

- Determinar la correlación entre la carga de inicio de deformación ( $P_0$ ), el índice de Meyer ( $n$ ) y el desgaste abrasivo ( $w$ ) en diferentes metales.

### **1.3.1. ESPECÍFICOS**

- Realizar distintos tratamientos térmicos de recocido, revenido y de templado-revenido a las distintas probetas de los aceros a utilizarse para aumentar la dureza y poder analizar cómo se comporta esta frente al desgaste.
- Determinar los parámetros de dureza Meyer ( $H_m$ ), índice de Meyer ( $n$ ) y carga inicial de deformación ( $P_0$ ), mediante el ensayo respectivo.
- Relacionar el índice de Meyer “ $n$ ” con el endurecimiento del material.

- Comparar los datos obtenidos teóricamente para el desgaste abrasivo con los prácticos realizados mediante el ensayo para el mismo.

#### **1.4. ALCANCE**

El proyecto tiene como alcance la determinación de la correlación entre la resistencia al desgaste abrasivo a partir de la dureza del material mediante el Ensayo de Dureza Meyer, de tal manera que se pueda predecir y prevenir de manera eficaz los riesgos y/o problemas causados por el desgaste de los metales.

El ensayo de Dureza Meyer es similar al de Dureza Brinell, con la diferencia de que se usa el área proyectada de la huella y se aprovecha su constante variación lineal de carga [6]. De manera, que al aplicar cargas progresivas al penetrador, se puede relacionar las cargas con el diámetro de huella [4-6].

El ensayo de Desgaste Abrasivo se lo realizará sometiendo el material analizado a la acción del abrasivo y se lo implementará en una máquina de desgaste tipo Pin on disc del laboratorio de Ciencias de Materiales y se evaluará la magnitud de la resistencia al desgaste mediante la pérdida de masa del material.

Se analizará la potencial correlación entre la resistencia al desgaste y los parámetros del ensayo Meyer para aceros de alto, mediano, bajo carbono, bronce y aluminio. A los aceros se les aplicará tratamientos térmicos de recocido, normalizado, templado y revenido.

## **1.5. JUSTIFICACIÓN**

La necesidad e importancia del presente proyecto radica en el estudio teórico del desgaste y la búsqueda de posibles predictores del mismo, para incrementar los conocimientos sobre el mismo y repercutir de forma significativa en la lucha por la disminución de sus efectos.

El desgaste constituye, junto a la corrosión, una de las principales pérdidas económicas del sector mecánico. La existencia de pares de rozamiento en todas las máquinas y la necesidad de actividades como el movimiento de tierra, la perforación y, la extracción de material pétreo, entre otras, exigen el estudio del desgaste como proceso y la forma de mitigarlo y predecirlo de manera eficaz.

## **CAPÍTULO 2**

### **2. MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. ENSAYO DE DUREZA MEYER**

##### **2.1.1. DEFINICIÓN DE DUREZA**

La dureza de un material es definida por muchos significados que dependen de la experiencia de la persona involucrada y el método para que se utiliza para la determinación de su valor. En general, dureza implica una resistencia a la deformación, y para metales una propiedad que mide la resistencia a la deformación elástica y plástica.

Algunas definiciones de dureza son las siguientes:

1. Dureza por penetración.
2. Dureza por rebote.
3. Dureza por desgaste.
4. Dureza por rayado.

La dureza por penetración es la más importante y relevante en el aspecto ingenieril para los metales. [6]

Los métodos para la medición de la dureza en su mayoría consisten en la aplicación de una carga con un indentador a un material a ensayar de manera que se genere una deformación local. Los valores resultantes son directamente dependientes del método y de las condiciones en las que se realiza el ensayo. Por lo cual para poder comparar estos valores de dureza obtenidos, es necesario señalar y aclarar de manera precisa los aspectos antes mencionados.

Los métodos que se utilizan para la determinación de la dureza se los clasifica según la forma de aplicación de la carga, como: estáticos y dinámicos.

- Ensayos estáticos: La carga que se aplica a la superficie mediante el indentador es estática y de forma lenta. Para determinar el valor de dureza en estos tipos de ensayos estáticos (Brinell, Knoop, Vickers, y Meyer) se obtiene el cociente de la carga aplicada por el área de la huella dejada por el indentador. El caso particular de la dureza Rockwell depende de la profundidad de la indentación.
- Ensayos dinámicos: La carga que se aplica es de impacto. Y normalmente se lo ejecuta dejando caer al indentador sobre la superficie ensayada a una altura conocida para determinar con la altura después del impacto la energía del mismo. Los ensayos de impacto más utilizados son: el de Shore y el de Leeb.

Normalmente la dureza se mide mediante una correlación con otra propiedad del material ensayado; como es la resistencia a la abrasión, a la corrosión, tracción, entre otras.

### **2.1.2. DUREZA MEYER**

“Meyer sugirió que una definición más racional de dureza que la propuesta por Brinell sería una basada en el área proyectada de la huella en lugar del área de la superficie. La presión media entre la superficie del penetrador y la indentación es igual a la carga dividida por el área proyectada de la indentación”.

Meyer propuso que esta presión media debía ser tomada como medida de dureza. Y se denomina como dureza Meyer y tiene las mismas unidades de la dureza Brinell [ $kg/mm^2$ ] [6].

$$\text{Dureza Meyer} = HM = \frac{4P}{\pi d^2} \quad (1)$$

Donde:

P = carga aplicada

d = diámetro de la huella [mm]

A diferencia de las Dureza Brinell:

$$\text{Dureza Brinell} = HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2)$$

Donde:

P = carga aplicada

d = diámetro de la huella [mm]

D = diámetro del punzón

En los ensayos de dureza Meyer y Brinell se usa indentadores de carburo de tungsteno de diferentes diámetros según los requerimientos del ensayo. Estos punzones tienen una muy elevada dureza y son muy resistentes a la deformación.

## 2.2. ENSAYO DE DESGASTE ABRASIVO

### 2.2.1. DEFINICIÓN DE DESGASTE

El desgaste es uno de los 3 problemas más grandes que se encuentran en la industria, y que conducen a los reemplazos de componentes y ensambles en la ingeniería, los otros son fatiga y corrosión. El desgaste rara vez es catastrófico, pero reduce la eficiencia en las operaciones por lo cual aumenta la pérdida de energía, el consumo de aceite y el costo de los componentes a reemplazarse. Aunque hay un sin número de

especificaciones disponibles para determinar las propiedades físicas y mecánicas de los metales, no hay especificaciones estándar para los ensayos de desgaste.

La fricción y el desgaste no son propiedades principales del material pero son características de los sistemas de ingeniería.

El desgaste se puede producir por diversas variaciones de condiciones y mecanismos que contribuyen al daño causado. La solución a problemas particulares depende de la precisión para identificar la naturaleza del problema. Por eso cambiar las condiciones de operación en muchos casos puede ser mejor que cambiar el material o su condición.

El desgaste ocurre por la interacción o el rozamiento entre dos o más superficies, en al menos una de ellas. La pérdida de material conlleva a la disminución de las dimensiones de las piezas o componentes y consecuente a la reducción del tiempo de vida útil de cualquier máquina. Pistones, anillos y sellos de los motores de combustión interna y los compresores de gas pierden eficiencia tan pronto como las superficies se empiezan a desgastar lo suficiente para permitir la filtración de gas o aceite a lugares no deseados, provocando una disminución de energía y un incremento en el consumo de aceite.

El desgaste en la industria puede ser dividido en las siguientes categorías, y estas pueden actuar separadas o juntas en algún mecanismo [8]:

- Abrasivo 50%
- Adhesivo 15%
- Erosión 8%
- Fretting (Fatiga por contacto) 8%
- Químico 5%

En función del tipo de material, el desgaste presenta tres comportamientos tal y como se observa en la figura 1.

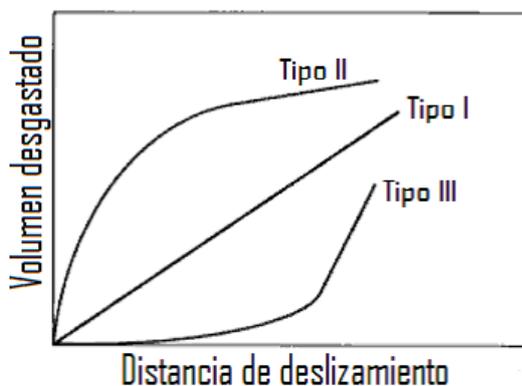


Figura 1: Comportamientos de desgaste [7]

En el comportamiento tipo (I), el volumen desgastado es proporcional a la distancia de deslizamiento. En el comportamiento tipo (II), típico de los metales, se inicia con un alto nivel de desgaste para posteriormente disminuir drásticamente. En el comportamiento tipo (III), presente en materiales frágiles, se inicia con un comportamiento muy resistente al desgaste y a partir de una cierta distancia, disminuye drásticamente [7].

Un método para evaluar el desgaste es mediante la tasa de desgaste.

$$u = \frac{V}{P \cdot l} \quad (3)$$

Donde:

$u$  = tasa de desgaste

$V$  = volumen desgastado (masa/densidad) [ $m^3$ ]

$P$  = carga aplicada [N]

$l$  = distancia recorrida [m]

El desgaste es complejo e involucra diversos mecanismos para la remoción de material y cambios irreversibles en la superficie de este. Este

desgaste afecta directamente al funcionamiento de los sistemas y equipos; y por ende tiene un impacto económico en la industria. Para aumentar la resistencia al desgaste se suele incrementar la dureza de la superficie mediante un tratamiento superficial. [9]

El desgaste abrasivo no solo depende de los factores como: dureza superficial del material, temperatura y carga. Existen otros distintos factores que influyen directamente a las características del desgaste como son: estructura del material, sus propiedades y composición química, el servicio al que va a estar expuesto, las condiciones a las que va a trabajar el material y otros factores como la lubricación y corrosión.

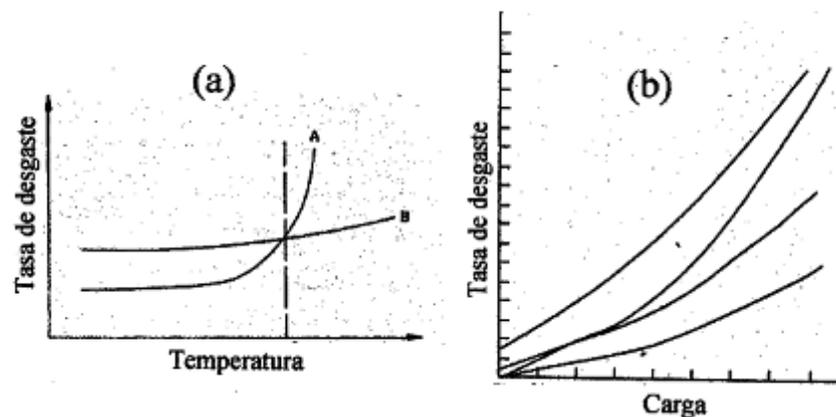


Figura 2: Factores que afectan al desgaste [9]

- a) Tasa de desgaste en función de la temperatura; b) Tasa de desgaste en función de la carga.

### 2.2.2. DEFINICIÓN DEL PROCESO DE DESGASTE ABRASIVO

Se conoce como desgaste abrasivo a la pérdida de masa que resulta de la interacción de partículas en movimiento frente a una superficie, penetrando y desplazando por su mayor dureza al material.

En la práctica, el desgaste abrasivo se puede clasificar de acuerdo al tipo de contacto entre las superficies: como abrasión de dos o tres cuerpos y como erosión (Fig 3).

El primero generalmente sucede bajo condiciones bajas de esfuerzo, cuando las asperezas de una superficie dura, presionan sobre otra más suave; al estar en movimiento relativo se genera el daño en esta última ya sea por deformación o desprendimiento del material (Fig 3a). El siguiente resulta de esfuerzos altos ya que las partículas son reducidas deliberadamente de tamaño o atrapadas entre dos superficies de contacto las cuales transmiten las cargas entre sí (Fig 3b). El desgaste erosivo se inicia cuando partículas duras, líquidos, o una mezcla de ambos, se impacta sobre una superficie sólida, generando un desprendimiento de material.

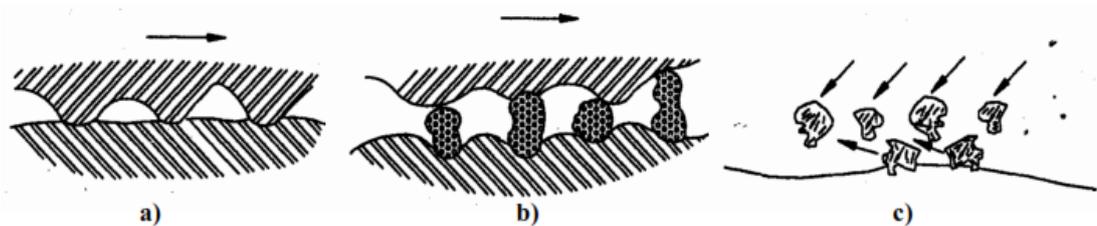


Figura 3: Clasificación del desgaste abrasivo por el tipo de contacto [11]

a) Abrasión de dos cuerpos; b) Abrasión de tres cuerpos; c) Erosión

El volumen de desgaste usualmente incrementa linealmente con la carga y la distancia recorrida. Si se produce una desviación suele ser debido a la reducción del tamaño de la partícula abrasiva o un atasco de la superficie.

En la pérdida de material pueden intervenir cuatro mecanismos de desgaste:

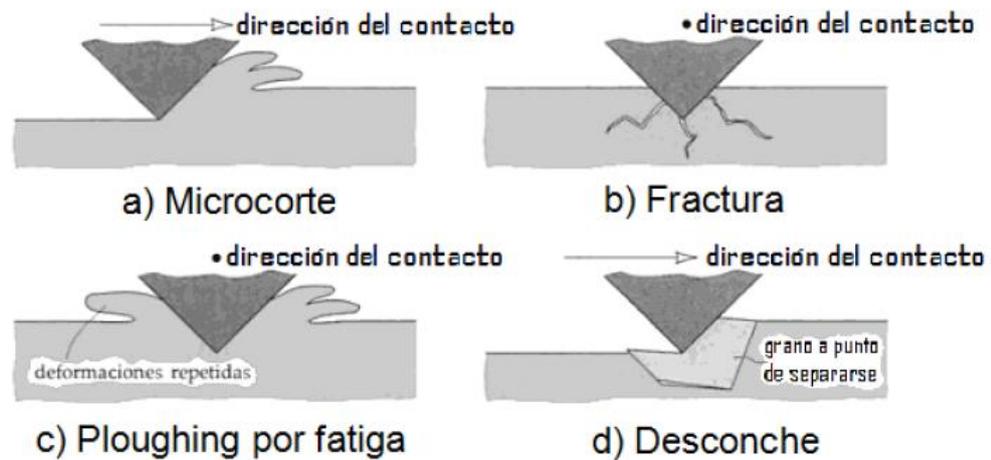


Figura 4: Mecanismos de desgaste abrasivo [7]

El primer mecanismo, tal y como se muestra en la figura 4a, representa el modelo clásico de microcorte donde una punta aguda o una aspereza de alta dureza corta una superficie de menor dureza. El material de la superficie desgastada es sacado mediante partículas. Cuando el material desgastado es frágil (Fig. 4b), como en el caso de la cerámica, puede tener lugar la fractura de la superficie desgastada. En este caso las partículas desgastadas son el resultado de la convergencia de distintas microgrietas. En el caso de desgastarse un material dúctil, el microcorte es improbable y la superficie desgastada es deformada repetidamente tal y como se muestra en la figura 4c, en este caso las partículas son el resultado de un proceso de desgaste por fatiga de bajo ciclos y se lo llama ploughing por fatiga o microsurcado. El último mecanismo, Fig. 4d, representa el desgaste por desconche o pull-out. Este mecanismo se presenta principalmente en cerámicas. [7]

### 2.2.3. EFECTOS SOBRE EL DESGASTE ABRASIVO

#### 2.2.3.1. EFECTOS DE LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

La dureza, tenacidad, módulo de elasticidad, estructura cristalina, microestructura y composición; son las principales propiedades de los

materiales que tienen una influencia directa sobre el comportamiento del desgaste abrasivo. En forma general se puede estipular que el coeficiente de desgaste abrasivo de una superficie, depende de la dureza de la superficie. Además de ser el parámetro más importante que afecta al desgaste abrasivo. La figura 5 muestra esta relación, además si la dureza del material es incrementada por trabajo en frío, o por un tratamiento térmico, la resistencia al desgaste es alterada; en general se observa que es favorable, pero en unos casos como en los materiales con pendiente negativa, la resistencia al desgaste disminuye. [9]

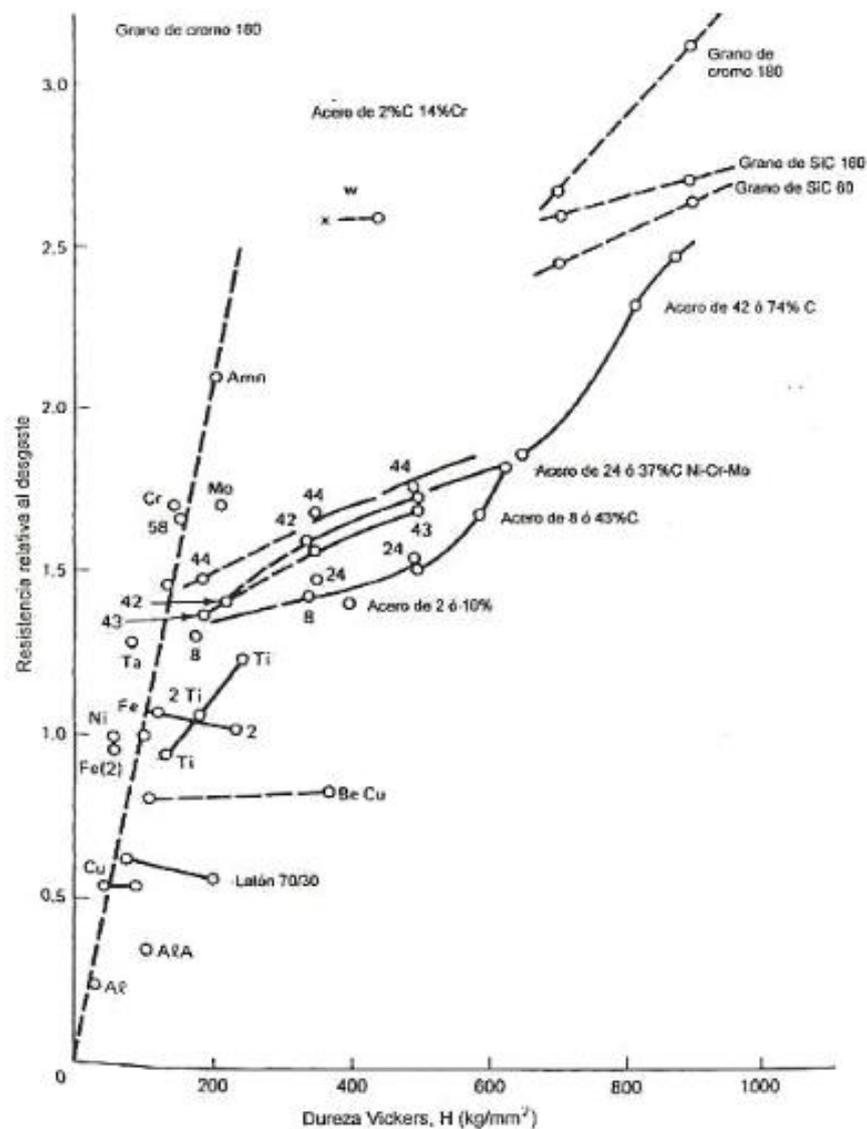


Figura 5: Resistencia al desgaste en función de la dureza. [9]

La resistencia relativa al desgaste, E, es directamente proporcional a la dureza, aunque esta relación se ha convertido en algo más complejo mientras la microestructura y la composición varía. El valor de E usualmente es mayor a 1, ya que el estándar es para durezas relativamente bajas. [8]

$$E = \frac{\textit{desgaste lineal estándar}}{\textit{desgaste lineal del material a prueba}} \quad (4)$$

### 2.2.3.2. EFECTO DE LAS PROPIEDADES DEL ABRASIVO

Hay propiedades que son de mucha importancia aparte de las antes mencionadas, ya que al cambiarlas también alteran el coeficiente de desgaste. La forma del abrasivo es de mucha importancia, debido a que este genera el surco, transmite la carga y los esfuerzos; por lo que los abrasivos con ángulos agudos causan mayor desgaste que los de forma redondeada.

Cuando se mantiene los mismos materiales y el mismo abrasivo, tan solo cambiando el tamaño de grano del abrasivo. Para tamaños de  $1 \mu\text{m}$ , el desgaste abrasivo es escaso y produce solo un pulido; el coeficiente de desgaste es directamente proporcional al tamaño de grano hasta el punto conocido como tamaño crítico del abrasivo; a partir de este punto el coeficiente de desgaste se mantiene constante (fig. 6).

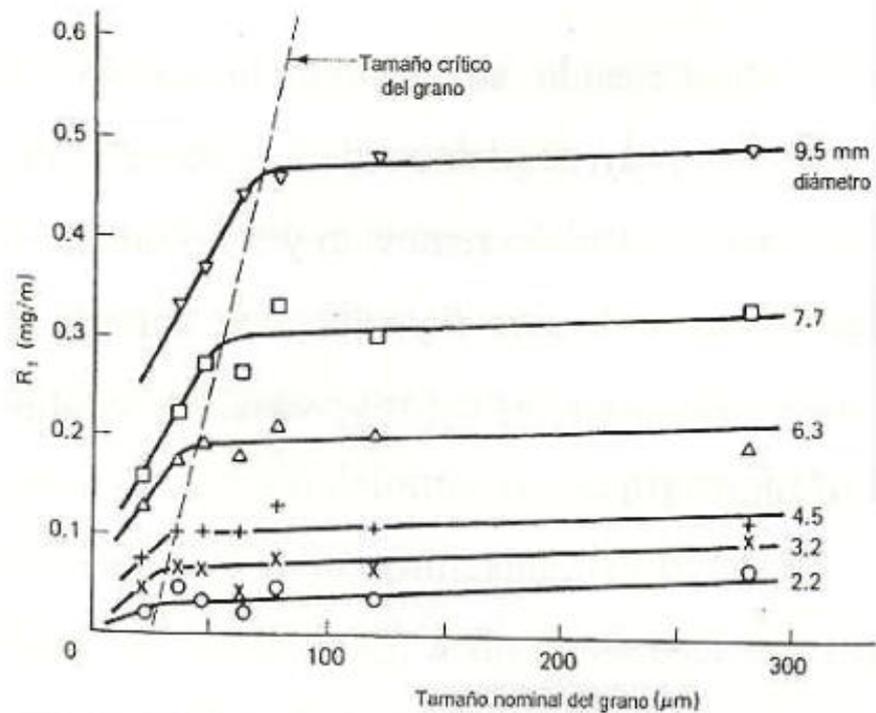


Figura 6: Coeficiente de desgaste en función del tamaño del abrasivo [9]

La composición química del abrasivo y del material también son parámetros importantes. Cuando estos pueden reaccionar químicamente o bien disolverse uno en otro; las partículas pueden deteriorarse y causar un mínimo desgaste.

### 2.2.3.3. EFECTO DEL MEDIOAMBIENTE

En la mayoría de casos cuando se incrementa la velocidad, se aumenta el coeficiente de desgaste, esto se atribuye al calentamiento por fricción. Esto debido a que en los metales la dureza y la resistencia a la fluencia disminuyen.

El efecto de la humedad depende del material, ya que puede aumentar o disminuir el coeficiente de desgaste.

## **2.2.4. FORMAS DE MEDICIÓN DEL DESGASTE**

Normalmente el desgaste se lo mide indirectamente en unidades de volumen perdido o desgastado [ $mm^3$ ] en función de algún parámetro determinado, para poderlo comparar con distintos materiales que tengan diferentes propiedades. Los métodos más utilizados para medirlo indirectamente son: pérdida de masa, área desgastada y medición lineal [9].

### **2.2.4.1. MEDICIÓN DEL DESGASTE POR MEDIO DE PÉRDIDA DE MASA**

Este procedimiento es el más usado y confiable, ya que el valor obtenido es de forma cuantitativa, además se requiera el equipo adecuado para su ejecución y precisión. El procedimiento consiste en pesar las probetas antes y después del ensayo de desgaste, para luego calcular la diferencia de masa perdida. Cabe recalcar que entre mayor precisión tengan los equipos de medición los resultados tendrán un menor rango de error y serán más confiables.

### **2.2.4.2. MEDICIÓN LINEAL DEL DESGASTE**

También se puede medir el desgaste por cambios dimensionales, como es el caso de la medición lineal. Para mediciones pequeñas el procedimiento se complica un poco por la dificultad de su cálculo y precisión. Este caso se puede observar en el desgaste de pernos sobre disco, en el cual el perno es el que sufre más desgaste. Para calcular este desgaste se toma la diferencia de alturas y se multiplica por el área de la sección transversal.

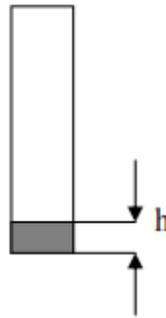


Figura 7: Volumen perdido de un perno [9]

### 2.2.4.3. MEDICIÓN DE ÁREA DE DESGASTE

El desgaste en ciertos contactos geométricos produce pérdida de material sobre un área, algunos ejemplos de estas áreas desgastadas se presentan en dientes de engranes, retenes de baleros, o las pastillas de frenos de los automóviles. Un claro ejemplo, de este tipo de medición es para las pruebas de desgaste de bloque sobre disco; donde la huella de desgaste en el bloque se observa en la figura 8 como un rectángulo, el que tiene una sección transversal curvada. Inicialmente el contacto entre el bloque y el disco, es una línea, pero conforme se va desgastando, el contacto entre ambos se convierte en un área.

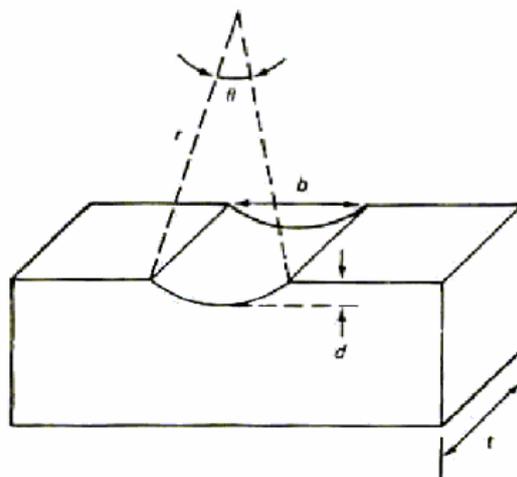


Figura 8: Bloque desgastado [9]

Para poder determinar el volumen perdido, se utiliza la siguiente expresión:

$$V = \frac{D^2 t}{8} \left[ 2 \sin^{-1} \frac{b}{D} - \sin \left( 2 \sin^{-1} \frac{b}{D} \right) \right] \quad (5)$$

V = Volumen Perdido

D = Diámetro = 2r = diámetro del disco

t = ancho de la huella de desgaste

$$b = D \sin \frac{\phi}{2}$$

#### 2.2.4.4. MEDICIÓN DE VOLUMEN DESGASTADO

La medición de volumen perdido, es una técnica demasiado costosa y requiere de equipos sofisticados, los cuales digitalizan las superficies dañadas y calculan el volumen desprendido y/o depositado en la superficie. Por ejemplo, cuando se presenta el fenómeno de adhesión y se quiere determinar la pérdida de material, una forma es a través de la diferencia de pesos, pero esta no es recomendable ya que el material puede presentar el desprendimiento del material base y en otra parte de este mismo, se presenta la adhesión del material en contacto.

### 2.3. TIPOS DE ALEACIONES

#### 2.3.1. ACERO

##### 2.3.1.1. DEFINICIÓN

El acero es, básicamente, una aleación de hierro y de carbono. El contenido del carbono en el acero es relativamente bajo. Como el carbono es

más ligero que el hierro, el porcentaje de masa de carbono en el acero es casi siempre menos del 2%.

El carbono tiene una gran influencia en el comportamiento mecánico de los aceros. El aumento del contenido de carbono eleva su resistencia a la tracción, incrementa el índice de fragilidad en frío y hace que disminuya la tenacidad y la ductilidad. En la figura 9 se puede apreciar como el contenido de carbono aumenta la resistencia a la tracción y en la fig. 10 como disminuye la ductilidad.

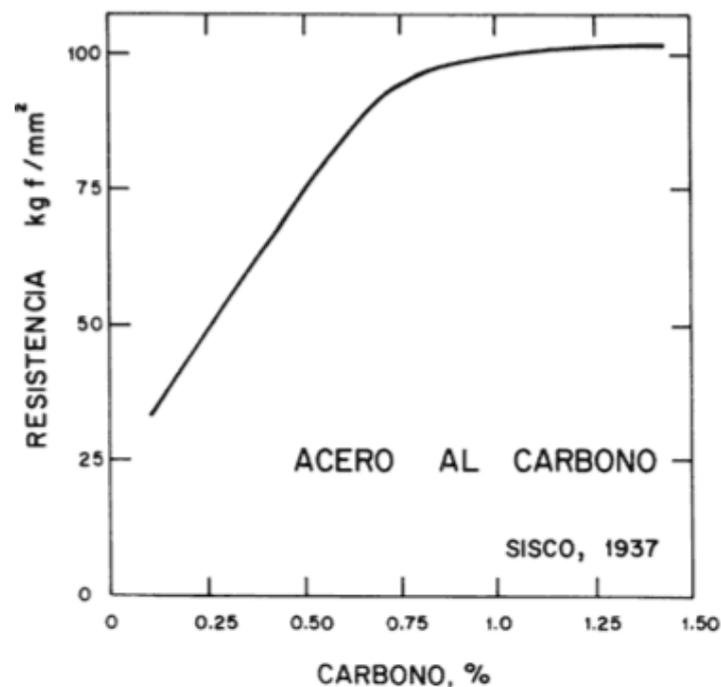


Figura 9: Efecto del contenido de carbono en la resistencia de los aceros  
[10]

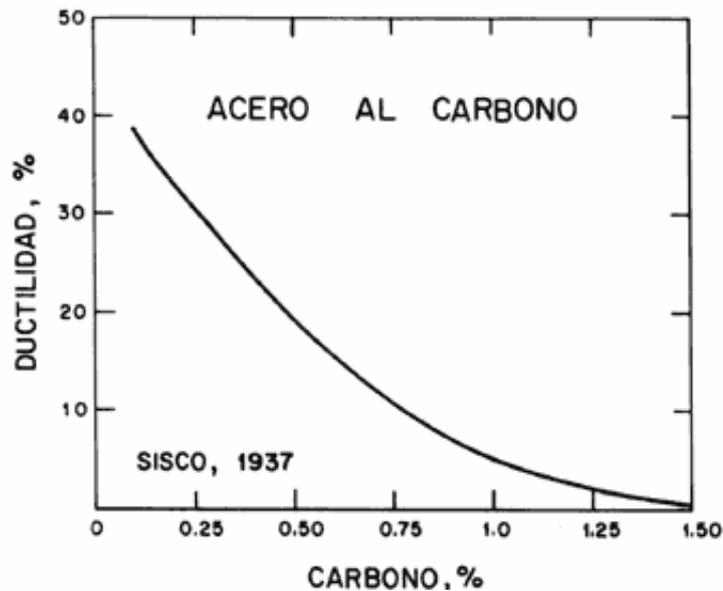


Figura 10: Efecto del contenido del carbono en la ductilidad de los aceros comunes [10]

### 2.3.1.2. DIAGRAMA HIERRO-CARBONO

En este diagrama de equilibrio o también llamado diagrama de fases (Fe-C) se aprecian las transformaciones de los aceros al carbono según la temperatura y su respectivo porcentaje de carbono. Para que estas fases se completen y se homogenicen de manera correcta el calentamiento o enfriamiento debe ser relativamente muy lento. La base para entender los tratamientos térmicos de los aceros es este diagrama se muestra en la figura 11.

A partir del diagrama Fe-C, puede predecirse de buena manera el tipo de constituyente que tendrá la aleación y sus propiedades. Además es una herramienta muy útil para saber el procedimiento correcto para realizar un tratamiento térmico y los resultados a esperarse.

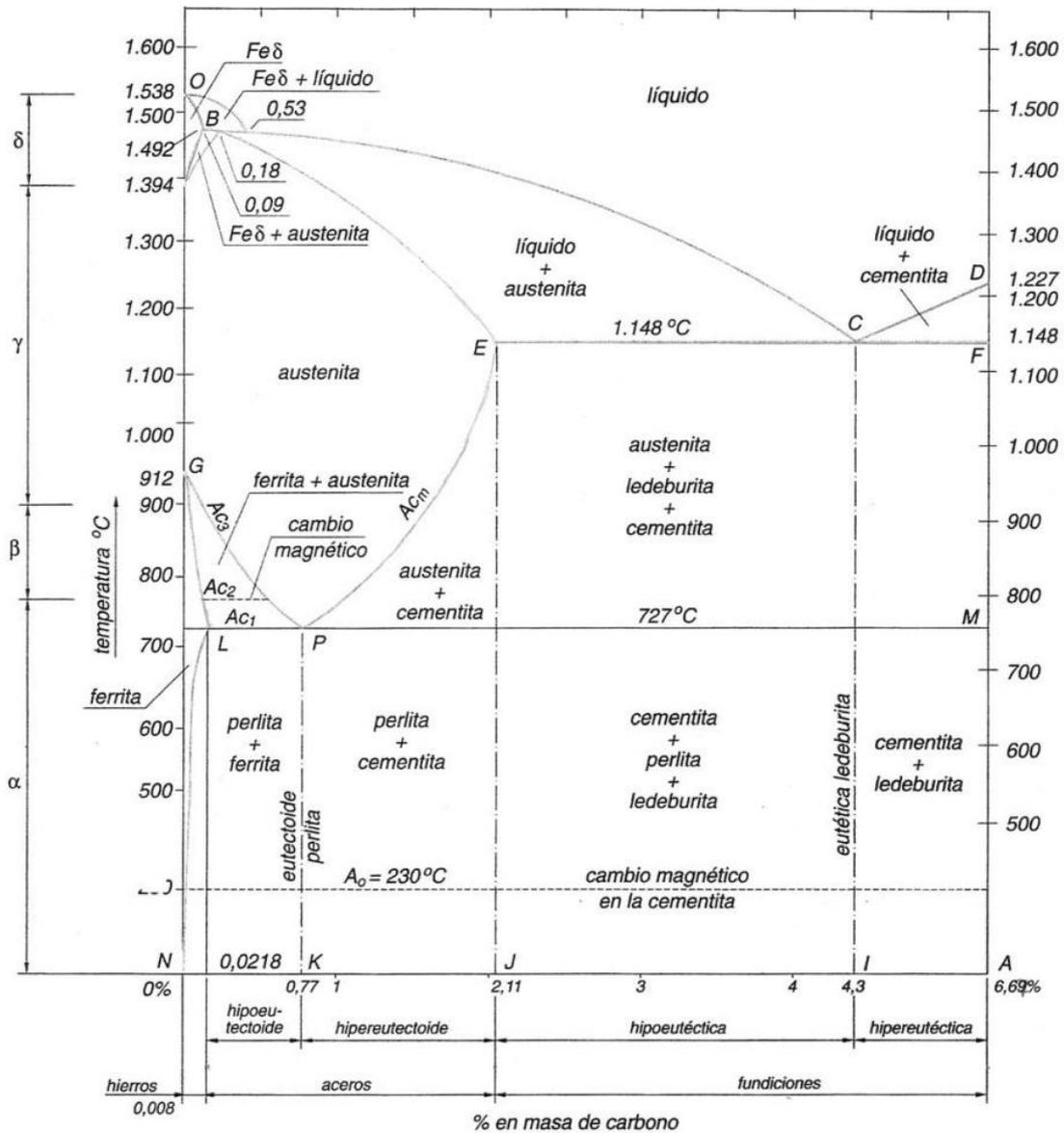


Figura 11: Diagrama hierro-carbono. [12]

### 2.3.1.3. FASES DEL DIAGRAMA HIERRO CARBONO

- **Austenita:** está formado por una solución sólida que resulta por la inserción de carbono en hierro  $\gamma$ , hasta 2,11% de carbono, que es la solubilidad máxima a 1130 °C de temperatura. No se la encuentra a temperatura ambiente. Es blando, deformable, tenaz y muy

resistente al desgaste. Es el constituyente más denso del acero y es no magnético. Presenta una estructura FCC y comienza a formarse a 727 °C y tiene una dureza de 300 Brinell. **Ferrita:** al igual que la austenita es una solución sólida de carbono en hierro  $\alpha$ . Es soluble a temperatura ambiente con el de 0.008% de carbono, por lo cual se lo denomina en ocasiones como hierro puro, su máxima solubilidad es de 0,02% C a 723 °C. Es el constituyente más blando del acero y tiene una dureza de 90 Brinell.

- **Cementita:** es un carburo de hierro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), es el constituyente más duro y frágil de los aceros con un 6,67% de carbono y alcanza una dureza de 700 Brinell.
  - **Perlita:** es el microconstituyente eutectoide formado por ferrita (88,7%) y cementita (11,3%). El contenido en carbono de la aleación es de 0,77%. Tiene una dureza de 250 Brinell. Aparece por el enfriamiento lento de la austenita y su transformación isotérmica de 650 a 723°C.
  - **Ledeburita:** es una aleación eutéctica con un contenido en carbono de 4,3% compuesta por austenita y cementita. Es un constituyente de las fundiciones y se forma por el enfriamiento de la fundición líquida de carbono (4.3% de C) desde 1130° C. Es estable hasta 723°C, desde los cuales se descompone en ferrita y cementita. A temperatura ambiente la ledeburita no se encuentra ya que se transforma por el enfriamiento llega a convertirse en perlita y cementita.
- [13, 14]

#### 2.3.1.4. MICROESTRUCTURA DE LOS ACEROS

- **Martensita:** Se produce por el enfriamiento rápido de la austenita y es una solución sólida sobresaturada de carbono en hierro  $\alpha$  con una elevada dureza gracias al porcentaje de carbono.
- **Bainita:** Es el constituyente entre la austenita y la martensita y se forma cuando la estructura ya austenizada se mantiene a temperatura constante durante un tiempo. Si la temperatura está entre 500 y 550°C, se obtiene una bainita denominada superior conformada por una matriz ferrítica. Otro tipo de bainita es la conocida como inferior, que se forma por la transformación isotérmica entre 250 y 400°C. Tiene una dureza variable de 40 a 60 Rc.
- **Sorbita:** Se produce por el enfriamiento de la austenita y la transformación isotérmica de esta entre los 600 a 650°C y el resultado es un agregado fino de cementita y ferrita. Su dureza es de 250 a 400 Brinell.
- **Troostita:** Es similar a la Sorbita por su enfriamiento y su transformación pero con un agregado muy fino de cementita y ferrita que se produce entre la temperatura de 500 a 600°C. Tiene propiedades intermedias entre la martensita y la sorbita. Su dureza está entre los 400 a 500 Brinell. [12]

### 2.3.1.5. CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS

Teniendo en cuenta las transformaciones recogidas en el diagrama Fe-C, los aceros se pueden clasificar en:

- **Aceros hipoeutectoides:** tienen un contenido entre 0,008% y a 0,77% C de carbono según el diagrama hierro-carbono y esta conformado por una mezcla de perlita más ferrita.
- **Aceros eutectoides:** presentan una fase austenítica sólida con una composición de 0.77% C. Cuando son enfriados desde esta fase, resultan las fases ferrita y cementita laminadas, formando la microestructura llamada perlita con propiedades intermedias de estas.
- **Aceros hipereutectoides:** tienen un contenido en carbono superior al 0,77% pero inferior a 2,11%. Principalmente están formados de carburo de hierro o normalmente llamado cementita que tiene una alta dureza.

Por su contenido de carbono, los aceros se clasifican como de bajo, medio y alto carbono.

- **Aceros con bajo contenido en carbono:** También se los llama normalmente aceros dulces y son los más utilizados en la industria. Tienen una composición entre 0,05% a 0,25% de carbono. Se usan de manera eficaz para trabajos de maquinado y en soldadura, también son más dúctiles y tenaces que los otros tipo de acero. Este acero tiene una microestructura ferrítica y perlítica. La adición de otros elementos y un adecuado tratamiento térmico puede mejorar sus propiedades mecánicas

- **Aceros medios en contenido en carbono:** Contiene entre 0,30% y 0,60% de carbono. El incremento de carbón significa un incremento de la dureza y la resistencia a la tensión, pero decrece la ductilidad y dificulta la maquinabilidad. Permite más tratamientos térmicos que el acero de bajo carbono pero de igual manera se pueden mejorar sus propiedades mecánicas añadiendo elementos aleantes. Además posee una microestructura martensítica revenida.
- **Aceros con alto contenido en carbono:** Entre 0,60% y 1,5% de carbono, son aceros muy duros y resistentes, de manera que se usan para la fabricación de herramientas para maquinar aceros. Para aumentar su resistencia al desgaste normalmente se usa el tratamiento térmico de templado y revenido. Mediante la adición de otros aleantes se pueden conseguir carburos de mayor dureza para trabajos especiales.

#### **2.3.1.6. TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS**

##### **2.3.1.6.1. DEFINICIÓN**

Los tratamientos térmicos que se realizan a los aceros u otros metales y aleaciones, siempre son efectuados en condiciones y temperaturas determinadas para su calentamiento o enfriamiento. Se los emplea para cambiar, mejorar o darle una característica más adecuada para su uso posterior. Estos tratamientos térmicos cambian estructuralmente al material y a sus propiedades mecánicas, pero no a su composición química.

### **2.3.1.6.2. ETAPAS DEL TRATAMIENTO TÉRMICO**

La mayoría de tratamientos térmicos se conforman por tres:

- Calentamiento de la pieza hasta la temperatura fijada de manera uniforme.
- Tiempo a la temperatura fijada para que se llegue a completar su transformación estructural.
- Enfriamiento definido según el tratamiento térmico que se realice.

### **2.3.1.6.3. TIPOS DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS**

Hay una variedad considerable de Tratamientos Térmicos según la característica que se desee obtener, pero en este capítulo solo se mencionarán tres de estos: Recocido, Temple y Revenido. A continuación se presentan las principales características de cada uno de estos tipos de Tratamientos Térmicos.

#### **2.3.1.6.3.1. RECOCIDO**

Es un tratamiento térmico en el cual el calentamiento de la pieza es elevado durante un largo tiempo. Este tratamiento tiene como función reducir las dislocaciones, ablandar el material para mejorar su ductilidad y maquinabilidad, y para aliviar los esfuerzos residuales causados por procesos de formado anteriores. [13]

#### **2.3.1.6.3.2. TEMPLE**

El temple de los aceros consiste en un calentamiento a temperatura por encima de su crítica superior para transformar toda la estructura del acero (perlita y ferrita) en austenita, seguido de un enfriamiento suficientemente rápido (con agua o aceite) para transformar la austenita en martensita. La transformación martensítica confiere al acero buenas

propiedades mecánicas: dureza y resistencia a la tracción pero disminuye el alargamiento, la estricción y la resiliencia, es decir, estamos ante un material frágil.

El proceso de temple consta esencialmente de tres etapas: una de calentamiento, otra de permanencia y otra de enfriamiento.

- En la etapa de calentamiento se transforma la masa del acero en austenita. En esta transformación interviene la velocidad de elevación de temperatura y el tiempo a la temperatura límite.
- En la etapa de enfriamiento se transforma la austenita transformada, en martensita. La velocidad de enfriamiento (velocidad crítica de temple) depende del contenido de carbono y puede variar de 200°C a 600°C por segundo. [14]

#### **2.3.1.6.3.3. REVENIDO**

Es un tratamiento complementario que se efectúa después del Temple, ya que cuando son templados los aceros, estos quedan muy duros y frágiles. Para eso se recurre al Revenido que reduce la dureza y la fragilidad del material, sin perder su tenacidad.

El revenido se efectúa a temperaturas entre 150°C y 650°C, y se consigue transformar la martensita monofásica en martensita revenida, formada por ferrita y cementita si primero se temple la austenita para producir martensita, y después se realiza el revenido. Se sacrifica dureza de la martensita a cambio de conseguir un comportamiento más dúctil y tenaz. Posteriormente, se enfría la pieza, generalmente al aire.

Los principales factores que influyen en el revenido son: el estado inicial de la pieza, la temperatura de revenido, la duración del revenido y el tamaño de la pieza. A pesar de que en teoría la velocidad de enfriamiento no

tiene influencia, no conviene enfriar muy rápidamente para evitar la aparición de tensiones internas.

El tratamiento de revenido controla las propiedades físicas del acero. (Ver Figura 12).

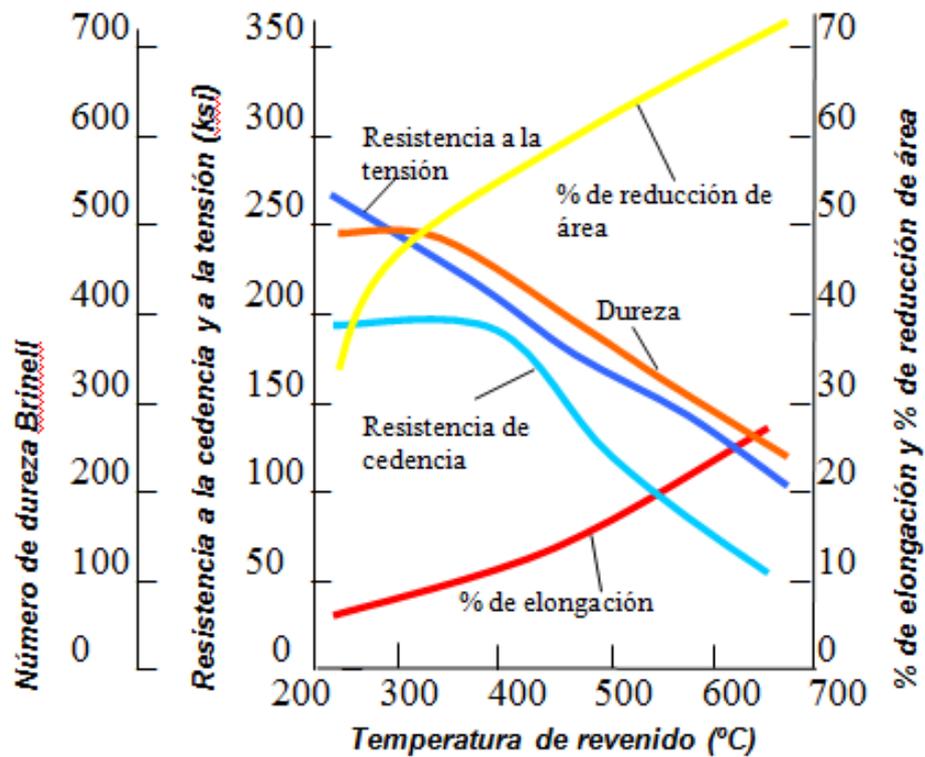


Figura 12: Efecto de la temperatura de revenido sobre las propiedades mecánicas de un acero SAE 1050 [13]

Es muy importante aclarar que con la realización del proceso de Revenido no se eliminan los efectos del Temple, solo se modifican, ya que se consigue disminuir la dureza y tensiones internas para lograr de ésta manera aumentar la tenacidad. [13, 14]

## **2.3.2. ALUMINIO**

### **2.3.2.1. DEFINICIÓN DE ALUMINIO**

El aluminio es uno de los principales componentes metálicos que existen. Tiene muchas características útiles en la industria como: un ligero peso, buena conductividad eléctrica, propiedades de resistencia a la corrosión únicas y un bajo punto fusión. Tiene una densidad aproximada a un tercio de la del acero. Gracias a su maleabilidad y ductilidad resulta muy usado en trabajos de maquinado y fundición. Este material tiene una característica importante en su proceso de oxidación que es la creación del óxido de aluminio o también llamado alúmina, que es una capa superficial que detiene y resiste el proceso de oxidación y brinda una buena impermeabilidad.

El aluminio normalmente va acompañado de aleantes como el cobre, manganeso, silicio, magnesio, entre otros que mejoran sus propiedades y características para que estas aleaciones sean adecuadas para un uso determinado. [15]

### **2.3.2.2. ALEACIONES DE ALUMINIO**

El aluminio puede mezclarse con otros metales para conseguir aleaciones que tengan una característica específica para una determinada finalidad. Los metales más empleados son: cobre, silicio, cinc, magnesio y manganeso. Y se pueden usar otros metales como secundarios.

#### **2.3.2.2.1. ALEACIÓN ALUMINIO-COBRE**

Son aleaciones muy duras ya que el cobre puede endurecer muy bien al aluminio pero brindando una buena maquinabilidad. Este tipo de aleación

tiene buena resistencia al calor y requiera de técnicas especializadas para su soldadura. Generalmente se las conoce como Cobral.

#### **2.3.2.2.2. ALEACIÓN DE ALUMINIO-SILICIO**

Es una de las aleaciones de aluminio más usadas y más importantes en la industria. Tiene un porcentaje de 5% a 20% de silicio. El silicio endurece al aluminio y aumenta la fluidez al momento de colarse. Estas aleaciones son muy dúctiles y tienen una buena resistencia al impacto y a la corrosión. Por otro lado su mecanizado es complicado.

#### **2.3.2.2.3. ALEACIÓN DE ALUMINIO-CINC**

Estas aleaciones son muy baratas en comparación con las demás pero brindan unas propiedades similares en algunos casos. Tienen un porcentaje máximo del 20% de Cinc. Se las conoce como Zincal.

#### **2.3.2.2.4. ALEACIÓN DE ALUMINIO-MAGNESIO**

Este tipo de aleación es muy ligera, incluso más que el aluminio en sí, con una buena facilidad de mecanizado y resistencia a la corrosión.

#### **2.3.2.2.5. ALEACIÓN DUROALUMINIO**

Esta aleación de aluminio tiene normalmente una composición de 95% de aluminio, 4% de cobre, 0.5% de magnesio y 0.5% de manganeso. El duraluminio tiene una resistencia a la tracción máxima cuando se envejecen naturalmente, esto quiere decir que se enfrían por un par de días a temperatura ambiente. También se pueden encontrar duraluminio con un contenido del 0.5% de silicio, el cual ayuda a las propiedades de mecanizado y moldeo.

Entre otras aleaciones de aluminio conocidas se puede encontrar: el anticorodal y el siluminio.

### **2.3.3. BRONCE**

#### **2.3.3.1. DEFINICIÓN DE BRONCE**

Es una aleación de cobre con estaño en su mayoría, y con un porcentaje de plomo, zinc, aluminio, silicio, entre otros según su aplicación. Su uso es diverso en la industria de la mecánica y en casos en instrumentos musicales.

El cobre presenta un fenómeno llamado pátina que es la corrosión espontánea del cobre y a diferencia del acero su punto de fusión es menor y más pesado. Además no genera chispas al golpear contra otro material y tiene buena conductividad térmica y calórica.

Existen dos tipos de Bronces:

- **Bronces de baja contracción:** Que son compuestos por cobre, estaño, plomo y zinc. Tienen buena resistencia al desgaste y a la corrosión química.
- **Bronces de alta contracción:** Principalmente esta compuestos de cobre con hierro y bajos porcentajes de aluminio, manganeso y silicio. También tienen buena resistencia al desgaste y a la corrosión, pero a diferencia de los de bajo concentración poseen una dureza superior.

Es importante mencionar que el proceso de Producción de Bronces Rojos y Bronces Amarillos debe estar completamente separado, ya que son muy contaminantes el uno con el otro. [15]

## CAPÍTULO 3

### 3. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

#### 3.1. METODOLOGÍA DEL ENSAYO DE DUREZA MEYER

##### 3.1.1. ENSAYO DE DUREZA MEYER

El ensayo de dureza Meyer para el presente proyecto consiste en la realización de un ensayo de penetración con un punzón esférico de 5 mm de diámetro en la máquina de ensayos universales marca AMSLER del laboratorio de Mecánica de Materiales (fig.13). Se aplicaron cargas de 250, 500, 750 y 1200 kgf a las probetas de acero; 250, 500, 750, 1000 kgf a las de duraluminio y 50, 150, 250 y 500 kgf a las de bronce. Tratando que la huella dejada no sobrepase la mitad del diámetro del penetrador y sea mayor que la cuarta parte del mismo ( $0,25D < d < 0,5D$ ) como se observa en la figura 14.



Figura 13: Ensayo de dureza a la probeta de bronce



Figura 14: Probetas después de realizado el ensayo de dureza con las diferentes cargas

#### PROBETAS:

Las probetas fueron de diámetro 19 mm por 12 mm de espesor y se garantizó que el espesor sea 10 veces mayor que la profundidad de la huella dejada por el penetrador. Además se efectuaron tratamientos térmicos de recocido, temple y revenido, y se tomaron 2 muestras por cada tratamiento para los posteriores ensayos de dureza Meyer. (ANEXO 1)

Se realizaron en total 45 probetas: 6 para el acero 1018 y DF2; 6 para bronce y duraluminio; 18 para el acero 1045 y 3 para el acero 4340 (fig19).

#### 3.1.2. MEDICIÓN DE LAS HUELLAS

Se realizaron 4 indentaciones por probeta en las diagonales a la mitad de la distancia del centro al vértice, cumpliendo que la distancia entre el borde de la probeta y el borde de la huella a otra sea 2,5 veces mayor al del diámetro de la huella. Para obtener el diámetro de las huellas se realizaron tres mediciones por huella y se determinó el diámetro medio de cada una con su respectiva varianza y desviación estándar.

El área de las huellas proyectadas se midió con el microscopio de herramientas del laboratorio de Metrología de apreciación de una milésima de milímetro (fig.15).



Figura 15: Microscopio de Herramientas de apreciación 0,001mm

### 3.2. METODOLOGÍA DEL ENSAYO DE DESGASTE ABRASIVO

El ensayo de desgaste abrasivo se lo realizó en la máquina de desbaste del laboratorio de Ciencia de Materiales (fig.16), reemplazando un portaprobetas por otro que satisfaga nuestras necesidades para las probetas a utilizarse y usando como abrasivo una lija para desgaste de metal.



Figura 16: Máquina de desbaste

En las probetas se realizaron 4 perforaciones parciales tipo avellanado en la mitad entre el vértice y el centro de sus respectivas diagonales (fig.17) para garantizar que el ensayo se realizó correctamente en lo referente al paralelismo entre la probeta y el disco abrasivo.

Para las perforaciones parciales se usó la punta de una broca de centros de  $118^\circ$ , y se lo montó en el taladro fresador universal del laboratorio de Máquinas y Herramientas. Posteriormente se procedió a medir y registrar los diámetros de las huellas obtenidas de la misma manera que en los ensayos de dureza. Después se colocó las probetas en el portabroquetas para la realización del ensayo de desgaste abrasivo con la carga del brazo mecánico de la máquina de 7 libras (3,18 kg) durante un tiempo específico para cada material y se volvió a repetir el proceso de medición y registro de las huellas.

Gracias a la forma cónica del avellanado y su conocido ángulo que no cambió, podemos medir los diámetros de las huellas dejado antes y después de realizado el ensayo de desgaste y determinar mediante fórmulas geométricas el volumen desgastado en el ensayo.

Volumen de un cilindro:

$$V_{cilindro} = \pi r^2 h$$

(6)

Volumen de un cono:

$$V_{cono} = \frac{1}{3} \pi r^2 h$$

(7)

Para comprobar que los volúmenes desgastados obtenidos son correctos, se procedió también a medir el peso inicial  $W_i$ , con una balanza electrónica de apreciación de 1 décima de gramo en el laboratorio de Física (fig.18), y el peso final  $W_f$  luego de realizar el ensayo de desgaste. Se calculó la diferencia en masa de cada probeta y se la multiplicó por su respectiva densidad teórica de catálogo para determinar el volumen desgastado y verificarlo con el procedimiento anterior.



Figura 17: Probetas luego de realizado las perforaciones parciales tipo avellanado



Figura 18: Balanza electrónica

Se usó como material abrasivo Tela Esmeril - K246 Metalite marca Norton de grano 50 y medidas: 225 x 275 mm, que es una lija de Oxido de Aluminio sobre respaldo de tela. Se usó una lija nueva para cada ensayo de desgaste.

#### PORTABROBETAS

Se realizó un portaprobetas de nylon para realizar los ensayos de desgaste, con las mismas dimensiones de los portaprobetas metálicos de la máquina de desgaste pero ajustándolo a nuestras probetas a ensayar y necesidades (fig.19), de manera que calce exactamente en el espacio seleccionado para este. (ANEXO 1)

Las probetas a utilizarse fueron de las misma dimensiones que las usadas para el ensayo de dureza Meyer.

Para conseguir las dimensiones dentro de nuestra tolerancia y caras con buen acabado superficial, se rectificaron las caras de todas las probetas.

A las probetas se les realizó tratamientos térmicos de recocido, revenido y temple, y se tomaron dos muestras por cada tratamiento para el ensayo de desgaste y dureza.



Figura 19: Probetas y portaprobetas

Ya que se usaron diferentes tiempos para los ensayos de desgaste conforme al material de la probeta, se calculó un índice de desgaste o razón de desgaste  $K$ . Que es el valor del desgaste para el tiempo del ensayo realizado, ya que el tiempo fue el único parámetro influyente que cambió al realizar los distintos ensayos. De esta manera se puede comparar los valores unos con otros.

### **3.3. DETERMINACIÓN DE LA RAZÓN DE ENDURECIMIENTO MEDIANTE EL ÍNDICE DE MEYER**

#### **3.3.1. ÍNDICE DE MEYER**

A partir de la dureza Meyer, se ha propuesto una relación empírica que relaciona la carga aplicada y el tamaño de la huella llamada Ley de Meyer o Índice de Meyer “ $n$ ”. [4]

$$P = P_o \cdot d^n \quad (8)$$

Donde:

P = Carga aplicada (kg)

Po = Constante, que expresa la resistencia del metal a la penetración.

d = Diámetro huella (mm)

n = Índice de Meyer

Mediante la aplicación de logaritmo a ec. 8 se obtuvieron los valores para el índice de Meyer “n” según la carga aplicada para sus posteriores análisis. El valor de “n” normalmente varía entre 2 y 2,5, y funciona como indicador de la capacidad de endurecimiento por deformación del material. Ya que el valor del índice de Meyer es aproximadamente igual al coeficiente de endurecimiento por deformación de la curva Esfuerzo-Deformación del ensayo de tracción aumentado en 2. [6]

La expresión logarítmica de ec. 8 es:

$$\log P = \log P_o + n \log d \quad (9)$$

Esta ecuación al relacionar la carga y el diámetro de la huella producida se obtiene una recta cuya pendiente es el valor de “n”. Además se puede obtener la mínima carga para la deformación plástica también conocida como la constante de la resistencia del metal a la penetración Po mediante el intercepto de la recta con el eje de las cargas [6]. Esta carga Po también funciona como indicador de la plasticidad del material.

Hay un límite inferior de carga, por debajo del cual la Ley de Meyer no es válida. Si la carga es muy pequeña, la deformación de la indentación no es completamente plástica y no cumple con la Ec. (8). Esta carga depende de la dureza del metal. [6]

### **3.3.2. CORRELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE MEYER “n”, CARGA MÍNIMA DE DEFORMACIÓN “Po” Y EL DESGASTE**

Después de que se comprobó la validez de los procedimientos y que los valores de los volúmenes desgastados son correctos se determinó el coeficiente de desgaste K para poder comparar los resultados. Luego se procedió a sacar una relación entre los resultados obtenidos contra el mayor valor de desgaste, con el fin de crear una relación adimensional r menor o igual a 1. Tomando el mayor desgaste un valor de 1 y los restantes fracciones de 1 para tener una mayor facilidad en su análisis.

Para la correlación se determinó la relación r vs n y r vs Po para observar y analizar el comportamiento de los distintos metales.

### **3.4. METODOLOGÍA DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS**

Con el fin de cambiar las propiedades de dureza de los metales que vamos a utilizar para nuestros análisis posteriores de dureza y desgaste, y la determinación de una correlación, los tratamientos térmicos que se realizaron fueron: recocido, temple y revenido para el caso de los aceros de medio carbono (AISI 1045). Los otros metales se los utilizó en su estado de entrega, es decir normalizados.

#### **3.4.1. TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS**

Para los tratamientos térmicos se tomó 6 probetas de acero 1045 para el recocido, otras 6 para el templado y revenido alto y las 6 restantes para el templado y revenido bajo.

### 3.4.1.1. RECOCIDO

Para el recocido se calentó las probetas a una temperatura de 870°C durante 1 hora y luego se las dejó enfriar en el horno hasta 650° C y luego al aire.

### 3.4.1.2. TEMPLE

Para cada tipo de acero hay una temperatura de austenización, determinada fundamentalmente por la composición. Sin embargo, ha sido la experimentación la que ha señalado el intervalo de temperatura hasta la cual se debe calentar el acero, la cual se escoge para que de la máxima dureza y al mismo tiempo mantenga también una estructura de grano fino; ello porque el valor de la temperatura depende, entre otras variables, de la forma de la pieza y del medio templante. El tamaño de la pieza a tratar puede variar el tiempo de sostenimiento, pero no la temperatura.

Se precalentaron las probetas hasta una temperatura entre 650 -700°C y después hasta la temperatura de austenización. Se definió la temperatura de austenización entre 790-820° C para un enfriamiento en agua, y se esperó que el acero llegue a su estado austenítico. En ese momento se empezó a contar el tiempo de sostenimiento, necesario para preparar la estructura adecuadamente. El tiempo de permanencia depende del acero. Los aceros ordinarios al carbono y los estructurales de baja aleación que contienen carburos fácilmente solubles, sólo requieren unos minutos de sostenimiento. Pero para asegurarnos que ha habido suficiente disolución de los carburos se aplicó la siguiente fórmula empírica según el diámetro de la pieza.

$$t = 20 + D/2 \quad (10)$$

Donde:

t = tiempo de tratamiento térmico en minutos

D = Diámetro de la pieza = 19 mm

Entonces:

$$t(\text{min}) = 29,5 \approx 30 \text{ minutos}$$

Esto para espesores menores de 25 mm, lo cual entra en nuestro caso para 12 mm de espesores de nuestras probetas, si el espesor es mayor se aplica otra fórmula.

#### **3.4.1.3. REVENIDO**

Las piezas se sometieron inmediatamente después del temple a un revenido de una hora y media, de 300° C para un revenido bajo y de 600 para un revenido alto. Estos tratamientos se realizaron con enfriamiento en agua.

Con el revenido se transforma la austenita retenida en martensita y bainita.

## CAPÍTULO 4

### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1. RESULTADOS DEL ENSAYO DE DUREZA MEYER

##### 4.1.1. MEDICIÓN HUELLAS DUREZA

Con las mediciones de las huellas tomadas después de realizado el ensayo de dureza se determinó la media de los diámetros con su respectiva varianza y desviación estándar para entender de una mejor forma los gráficos.

Tabla 1: Media Diámetros, Varianza y Desviación Estándar

MATERIAL	DIÁMETRO MEDIO d [mm]	VARIANZA $\sigma^2$	DESVIACIÓN ESTÁNDAR $\sigma$
ACERO 1018	2,167	0,000000	0,000250
	1,837	0,000128	0,011314
	1,338	0,000020	0,004416
	2,702	0,000014	0,003793
ACERO 1045 RECOCIDO	2,336	0,000083	0,009095
	1,914	0,000241	0,015521
	1,370	0,000131	0,011433
	2,864	0,000079	0,008873
ACERO 1045 REVENIDO BAJO	0,000	0,000000	0,000000
	1,395	0,000005	0,002160
	1,503	0,000001	0,001080
	1,761	0,000034	0,005807
ACERO 1045 REVENIDO ALTO	1,998	0,000043	0,006549
	1,631	0,000091	0,009548
	1,214	0,000003	0,001841
	2,548	0,000124	0,011146
ACERO DF2	2,032	0,000001	0,001080
	1,732	0,000003	0,001780
	1,264	0,000010	0,003091
	2,552	0,000004	0,001886

CONTINUA 

MATERIAL	DIÁMETRO MEDIO d [mm]	VARIANZA $\sigma^2$	DESVIACIÓN ESTÁNDAR $\sigma$
DURALUMINIO	1,837	0,000001	0,001000
	2,205	0,000002	0,001250
	2,527	0,000000	0,000500
	1,362	0,000003	0,001750
BRONCE	2,008	0,000012	0,003500
	2,609	0,000039	0,006250
	1,555	0,000169	0,013000
	0,955	0,000000	0,000250

- Los rangos de la desviación estándar para las mediciones de las huellas muestran que las dispersiones de los valores obtenidos fueron prácticamente nulos.

#### 4.1.2. RESULTADOS DUREZA

Tabla 2: Resultados de Dureza

ENSAYO DE DUREZA						
Diámetro Punzón = 5 mm						
MATERIAL	# Huella	CARGA P [Kgf]	TIEMPO t [s]	HUELLA d [mm]	Dureza Meyer [kgf/mm <sup>2</sup> ]	Dureza Brinell [kgf/mm <sup>2</sup> ]
ACERO 1018	3	250	15	1,338	177,935	174,693
	2	500		1,837	188,755	182,158
	1	750		2,167	203,401	193,356
	4	1200		2,702	209,328	192,734
ACERO 1045 RECOCIDO	3	250	15	1,370	169,635	166,390
	2	500		1,914	173,718	167,100
	1	750		2,336	174,945	164,808
	4	1200		2,864	186,249	169,456
ACERO 1045 REVENIDO BAJO	1	-	15	0,000	0,000	0,000
	2	750		1,395	490,708	480,965
	3	900		1,503	507,434	495,703
	4	1200		1,764	491,154	475,367

CONTINUA 

MATERIAL	# Huella	CARGA P [Kgf]	TIEMPO t [s]	HUELLA d [mm]	Dureza Meyer [kgf/mm <sup>2</sup> ]	Dureza Brinell [kgf/mm <sup>2</sup> ]
<b>ACERO 1045 REVENIDO ALTO</b>	3	250	15	1,214	215,920	212,689
	2	500		1,631	239,463	232,918
	1	750		1,998	239,171	229,206
	4	1200		2,548	235,400	218,975
<b>ACERO DF2</b>	3	250	15	1,264	199,126	195,890
	2	500		1,732	212,342	205,772
	1	750		2,032	231,386	221,407
	4	1200		2,552	234,540	218,110
<b>DURALUMI NIO</b>	4	250	30	1,362	171,655	168,410
	1	500		1,837	188,652	182,055
	2	750		2,205	196,450	186,385
	3	1000		2,527	199,388	185,719
<b>BRONCE</b>	4	50	30	0,955	69,766	69,124
	3	150		1,555	78,984	77,026
	1	250		2,008	78,984	75,661
	2	500		2,609	93,544	86,673

- Según el diámetro de la huella a la misma carga, se obtuvo la dureza y se determina cual material es más resistente a la penetración o más duro. Con los resultados se visualiza que el acero 1045 con revenido bajo es el más resistente a la penetración seguido del acero con revenido alto, luego el acero DF2, el acero 1018 normalizado y el duraluminio. El metal que presentó menor dureza es el bronce seguido por el acero 1045 recocado.

#### 4.1.3. ÍNDICE DE MEYER Y CARGA MÍNIMA DE DEFORMACIÓN

Mediante las siguientes gráficas de logaritmo de “d” vs logaritmo de “P” de las tablas 1 y 2 para los distintos metales ensayados se pudo obtener la pendiente de la recta que nos sirve para determinar el Índice de Meyer “n” y

la Carga mínima de deformación “Po” con la aplicación de la Ec. 9 antes mencionada. Luego se registró los valores en la tabla 3.

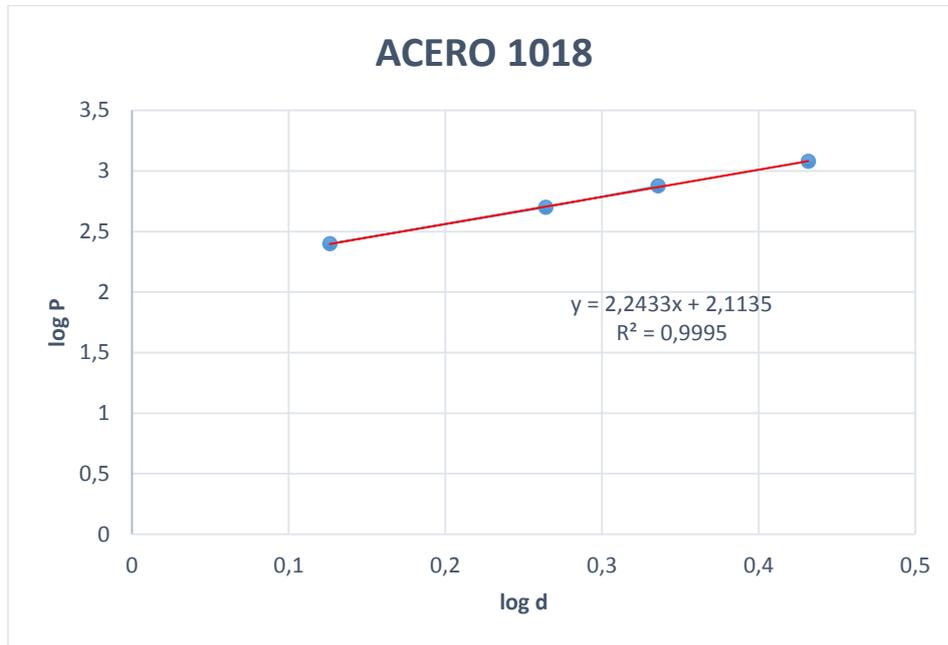


Figura 20: Grafica log d vs log P del Acero 1018

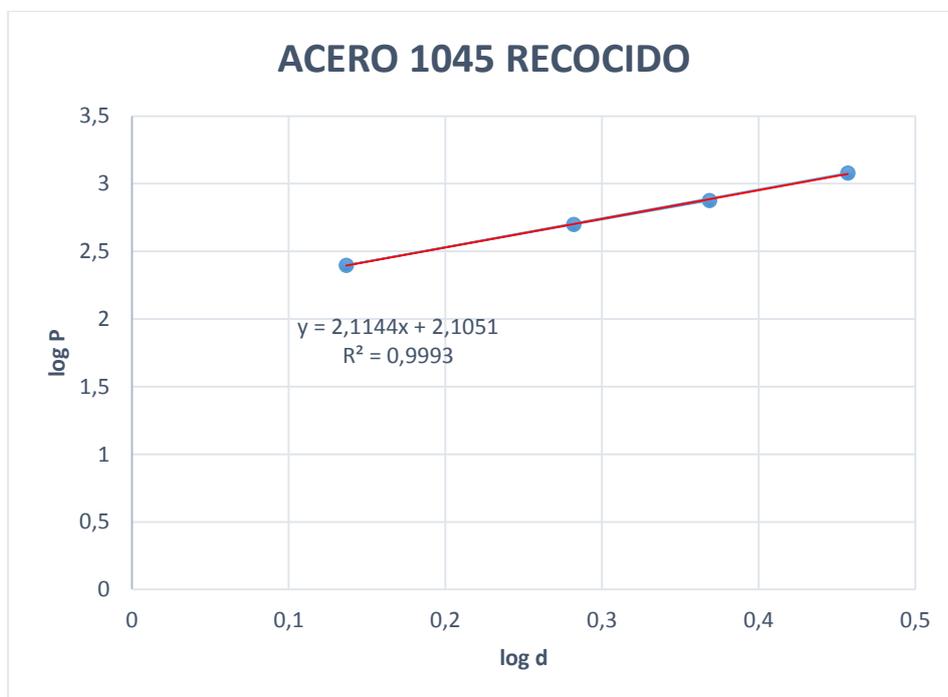


Figura 21: Grafica log d vs log P del Acero 1045 Recocido



Figura 22: Grafica log d vs log P del Acero 1045 Revenido Bajo

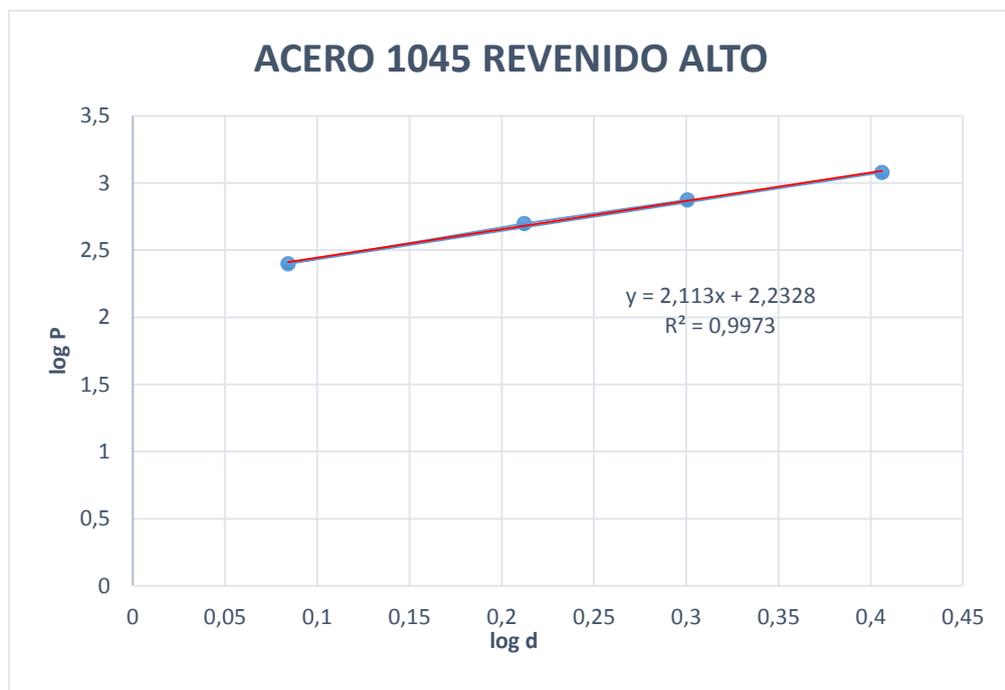


Figura 23: Grafica log d vs log P del Acero 1045 Revenido Alto

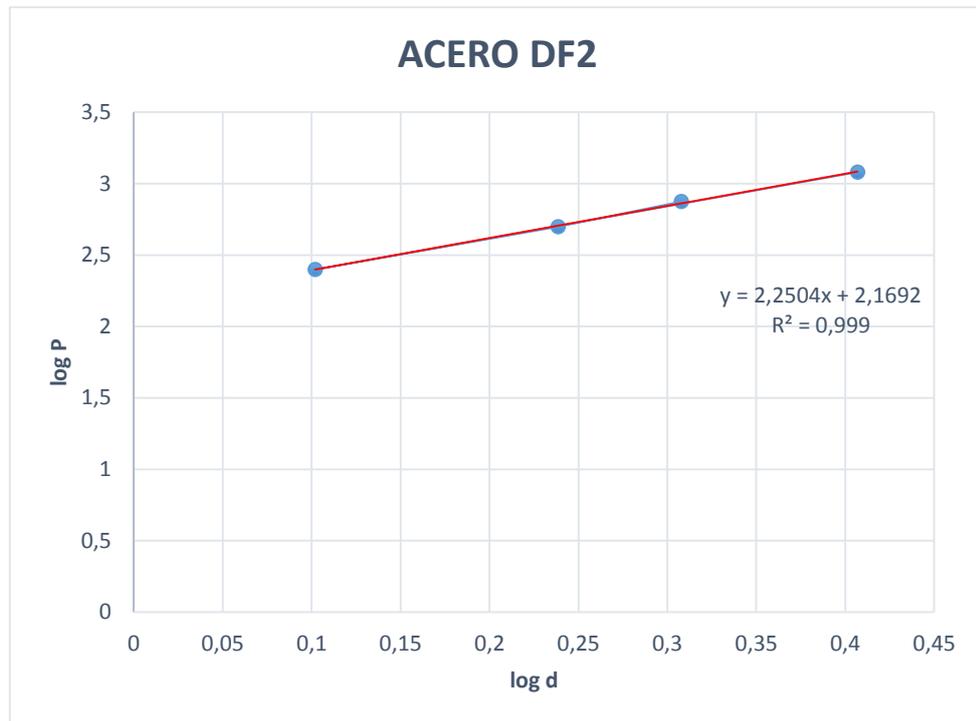


Figura 24: Grafica log d vs log P del Acero DF2

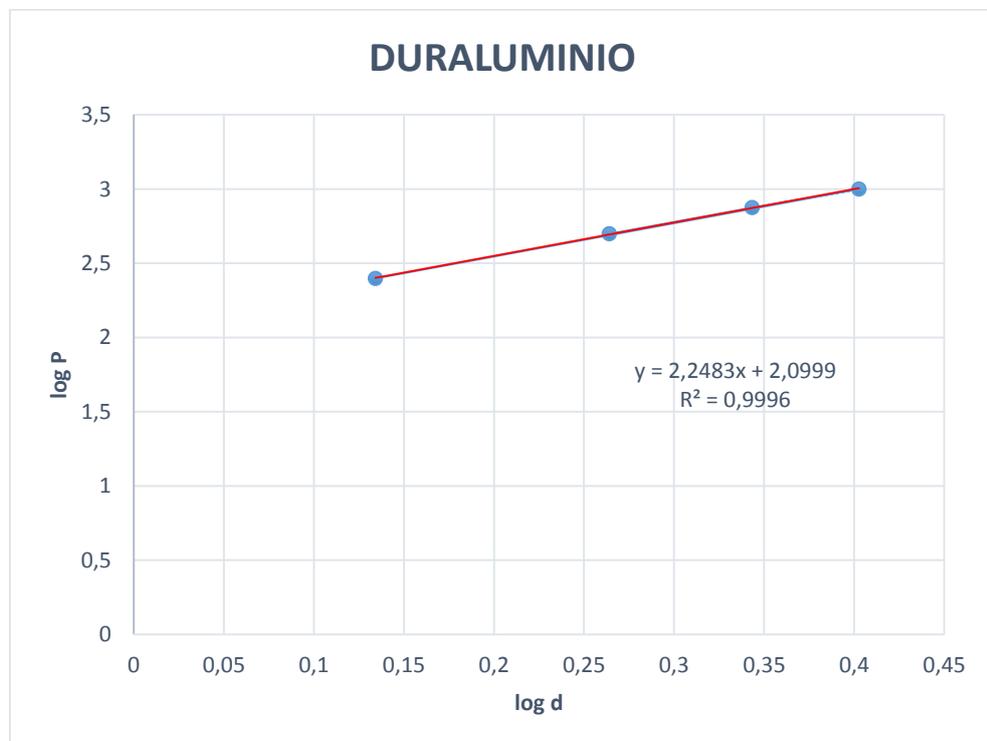


Figura 25: Grafica log d vs log P del Duraluminio

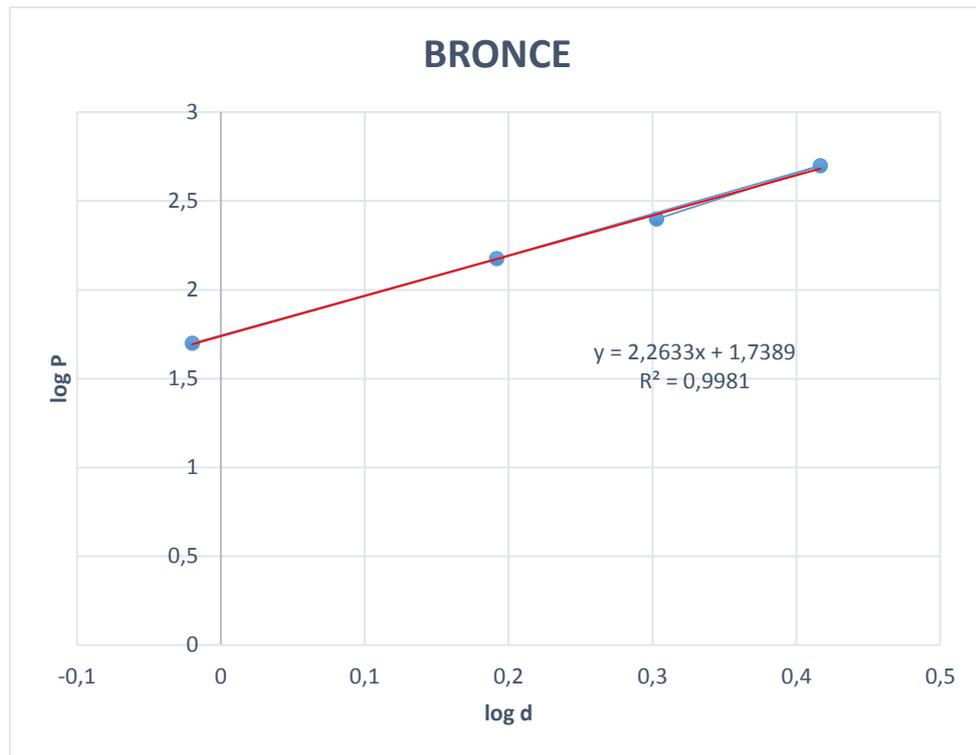


Figura 26: Grafica log d vs log P del Bronce

Tabla 3: Índice de Meyer "n" y Carga Mínima de deformación "Po"

<b>MATERIAL</b>	<b>Ec. Paramétrica</b>	<b>Índice de Meyer "n"</b>	<b>Carga Mínima de deformación "Po" [kgf]</b>
<b>ACERO 1018</b>	$P = 2,2433d + 2,1135$	2,2433	129,867
<b>ACERO 1045 RECOCIDO</b>	$P = 2,1144d + 2,1051$	2,1144	127,380
<b>ACERO 1045 REVENIDO BAJO</b>	$P = 1,9807d + 2,5951$	1,9807	393,641
<b>ACERO 1045 REVENIDO ALTO</b>	$P = 2,113d + 2,2328$	2,1130	170,923
<b>ACERO DF2</b>	$P = 2,2504d + 2,1692$	2,2504	147,639
<b>DURALUMINIO</b>	$P = 2,2483d + 2,0999$	2,2483	125,864
<b>BRONCE</b>	$P = 2,2633 + 1,7389$	2,2633	54,815

- Con los datos obtenidos de las ecuaciones paramétricas de las gráficas, vemos que el acero 1045 con revenido bajo presenta el menor índice de Meyer de 1,9807 y la mayor carga mínima de deformación de 393,641 kgf. Por el otro lado el bronce presenta el mayor índice de Meyer de 2,263 y la menor carga mínima de deformación de 54,815. Los demás metales tienen un índice de Meyer que varía entre 2,11 y 2,25, lo cuales están en el rango normal de aceros al carbono y una carga mínima de deformación entre 125 y 171 kgf.

## 4.2. RESULTADOS DEL ENSAYO DE DESGASTE ABRASIVO

### 4.2.1. MEDICIÓN HUELLAS DESGASTE

Después de realizar las perforaciones parciales se midió los diámetros de las huellas dejadas antes y después del ensayo de desgaste y se obtuvo la media inicial “D0” y final “D1” con sus respectivas varianzas y desviaciones estándar.

Tabla 4: Media Diámetro Inicial, Varianza y Desviación Estándar

MATERIAL	# Huella	MEDIA INICIAL D0 [mm]	VARIANZA $\sigma^2$	DESVIACIÓN ESTÁNDAR $\sigma$
<b>ACERO 1018</b>	1	3,696	0,000145	0,012058
	2	4,088	0,000065	0,008042
	3	4,018	0,000220	0,014838
	4	4,147	0,000036	0,006014
<b>ACERO 1045 RECOCIDO</b>	1	3,873	0,000402	0,020043
	2	3,566	0,000396	0,019901
	3	3,739	0,000796	0,028217
	4	3,826	0,000764	0,027648
<b>ACERO 1045 REVENIDO BAJO</b>	1	4,078	0,000092	0,009600
	2	4,187	0,000006	0,002550
	3	4,037	0,000223	0,014939
	4	3,924	0,000056	0,007450

CONTINUA 

MATERIAL	# Huella	MEDIA INICIAL D0 [mm]	VARIANZA $\sigma^2$	DESVIACIÓN ESTÁNDAR $\sigma$
<b>ACERO 1045 REVENIDO ALTO</b>	1	3,504	0,000281	0,016760
	2	3,698	0,000685	0,026180
	3	3,618	0,000131	0,011448
	4	3,522	0,000042	0,006459
<b>ACERO DF2</b>	1	3,756	0,000189	0,013738
	2	3,812	0,000008	0,002859
	3	3,903	0,000262	0,016198
	4	3,929	0,000101	0,010036
<b>DURALUMINIO</b>	1	4,408	0,000253	0,015922
	2	4,195	0,000189	0,013738
	3	4,164	0,000070	0,008370
	4	4,314	0,000805	0,028379
<b>BRONCE</b>	1	3,832	0,000157	0,012519
	2	3,939	0,000046	0,006762
	3	3,805	0,000073	0,008524
	4	3,848	0,000052	0,007192

Tabla 5: Media Diámetro Final, Varianza y Desviación Estándar

MATERIAL	# Huella	MEDIA FINAL D1 [mm]	VARIANZA $\sigma^2$	DESVIACIÓN ESTÁNDAR $\sigma$
<b>ACERO 1018</b>	1	1,364	0,000002	0,001250
	2	1,695	0,004323	0,065750
	3	1,647	0,001139	0,033750
	4	2,016	0,000001	0,001000
<b>ACERO 1045 RECOCIDO</b>	1	2,499	0,007788	0,088250
	2	1,734	0,002450	0,049500
	3	1,863	0,010455	0,102250
	4	2,395	0,000100	0,010000
<b>ACERO 1045 REVENIDO BAJO</b>	1	3,018	0,000020	0,004500
	2	3,268	0,000014	0,003750
	3	3,277	0,000189	0,013750
	4	2,923	0,002576	0,050750

CONTINUA 

MATERIAL	# Huella	MEDIA FINAL D1 [mm]	VARIANZA $\sigma^2$	DESVIACIÓN ESTÁNDAR $\sigma$
<b>ACERO 1045 REVENIDO ALTO</b>	1	2,201	0,000000	0,000250
	2	1,636	0,000028	0,005250
	3	2,278	0,000002	0,001250
	4	2,165	0,000030	0,005500
<b>ACERO DF2</b>	1	2,548	0,000056	0,007500
	2	2,527	0,000023	0,004750
	3	2,683	0,000002	0,001500
	4	2,586	0,000033	0,005750
<b>DURALUMINIO</b>	1	3,070	0,000046	0,006750
	2	2,516	0,000005	0,002250
	3	2,480	0,000000	0,000000
	4	2,979	0,000009	0,003000
<b>BRONCE</b>	1	2,460	0,000009	0,003000
	2	2,296	0,000169	0,013000
	3	2,134	0,000138	0,011750
	4	2,376	0,000036	0,006000

- Los rangos de la desviación estándar para las mediciones de desgaste antes y después muestran que las dispersiones de los valores obtenidos fueron prácticamente nulos.

#### 4.2.2. CÁLCULO DEL VOLUMEN DESGASTADO

Con las medidas de los diámetros D0 y D1 se calculó la diferencia “x” y el volumen desgastado promedio por muestra para luego compararlo con los resultados obtenidos en el procedimiento con la balanza electrónica.

Para el volumen desgastado se calculó primeramente la altura desgastada para cada huella y posteriormente el volumen por huella desgastado mediante la diferencia de volúmenes de un cono con un ángulo conocido, en nuestro caso de 118°. Conociendo la altura promedio y el volumen desgastado de las huellas se obtuvo el volumen total desgastado.

$$V_{tdesg} = V_{altura} - V_{huella}$$

Donde:

$V_{t\text{desg}}$  = Volumen total desgastado

$V_{\text{altura}}$  = Volumen de un cilindro con la altura promedio desgastada (ec. 7)

$V_{\text{huella}}$  = Volumen de huella desgastado por 4 (ec. 6) ya que son 4 huellas por probeta.

Tabla 6: Volumen total desgastado con Diferencia de diámetros "x"

<b>MATERIAL</b>	<b># Huella</b>	<b>Diferencia de Diámetros x [mm]</b>	<b>Altura Desgastada h [mm]</b>	<b>Volumen por huella desgastada [mm<sup>3</sup>]</b>	<b>Volumen total desgastado [mm<sup>3</sup>]</b>
<b>ACERO 1018</b>	1	2,332	0,7005	3,7708	178,006
	2	2,393	0,7190	4,9905	
	3	2,371	0,7122	4,7489	
	4	2,131	0,6402	4,9649	
<b>ACERO 1045 RECOCIDO</b>	1	1,374	0,4129	3,3428	125,298
	2	1,833	0,5506	3,1579	
	3	1,876	0,5636	3,6031	
	4	1,431	0,4300	3,3257	
<b>ACERO 1045 REVENIDO BAJO</b>	1	1,061	0,3186	3,1730	68,255
	2	0,919	0,2760	3,0267	
	3	0,760	0,2284	2,4075	
	4	1,001	0,3007	2,7867	
<b>ACERO 1045 REVENIDO ALTO</b>	1	1,303	0,3913	2,5444	117,458
	2	2,062	0,6195	3,6340	
	3	1,339	0,4024	2,7938	
	4	1,357	0,4076	2,6376	
<b>ACERO DF2</b>	1	1,208	0,3628	2,8654	95,133
	2	1,285	0,3860	3,0871	
	3	1,220	0,3666	3,1579	
	4	1,342	0,4033	3,4086	
<b>DURALUMI NIO</b>	1	1,338	0,4021	4,4613	110,813
	2	1,678	0,5042	4,5520	
	3	1,684	0,5060	4,4790	
	4	1,335	0,4011	4,2361	
<b>BRONCE</b>	1	1,372	0,4121	3,2537	117,027
	2	1,644	0,4938	3,8562	
	3	1,670	0,5018	3,5665	
	4	1,472	0,4423	3,4270	

Como comprobación del método anterior se realizó un procedimiento usando los pesos de las probetas antes y después de realizado el ensayo de desgaste obteniendo los siguientes valores.

Tabla 7: Volumen total desgastado con Diferencia de Pesos "G"

MATERIAL	PESO INICIAL W0 [g]	PESO FINAL W1 [g]	Tiempo [s]	Diferencia de PESOS G [g]	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	Volumen desgastado [mm <sup>3</sup> ]
	0		0			0
ACERO 1018	26,2	24,8	120	1,4	7,85	178,344
ACERO 1045 RECOCIDO	25,1	24,1	90	1	7,85	127,389
ACERO 1045 REVENIDO BAJO	25,4	24,9	90	0,5	7,85	63,694
ACERO 1045 REVENIDO ALTO	25	24,1	90	0,9	7,85	114,650
ACERO DF2	25,7	25	90	0,7	7,69	91,027
DURALUMINIO	9,5	9,2	60	0,3	2,83	106,007
BRONCE	30	29,1	30	0,9	7,8	115,385

Comprobando los valores de los dos procedimientos podemos encontrar los siguientes porcentajes de error.

Tabla 8: Comparación entre el método gravímetro y el geométrico.

MATERIAL	Volumen Desgastado con x [mm <sup>3</sup> ]	Volumen Desgastado con G [mm <sup>3</sup> ]	% de error porcentual
ACERO 1018	178,006	178,344	0,190
ACERO 1045 RECOCIDO	125,298	127,389	1,669
ACERO 1045 REVENIDO BAJO	68,255	63,694	6,682
ACERO 1045 REVENIDO ALTO	117,458	114,650	2,391
ACERO DF2	95,133	91,027	4,316
DURALUMINIO	110,813	106,007	4,337
BRONCE	117,027	115,385	1,403

- Los % de error de los metales están en el rango aceptable que es menor al 5%. El caso del acero 1045 con revenido alto se encuentra un error% del 6,682%, ya que al ser el menor desgastado requiere mayor precisión al momento de pesarlo, lo cual conlleva a una medida no tan exacta para su análisis.

A continuación se detallan las siguientes gráficas comparando ambos volúmenes desgastados, siendo “V con x” el volumen calculado con la diferencia de diámetros “x” y “V con G” el volumen calculado con la diferencia de pesos “G”, vs el tiempo empleado para cada material.

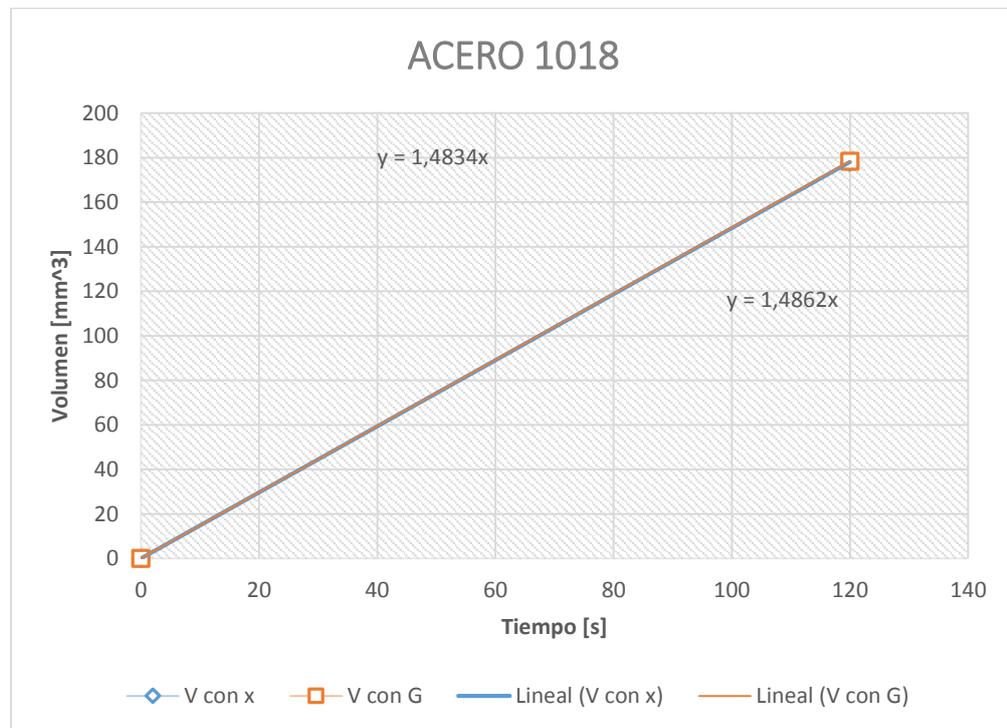


Figura 27: Gráfica tiempo vs volumen del Acero 1018

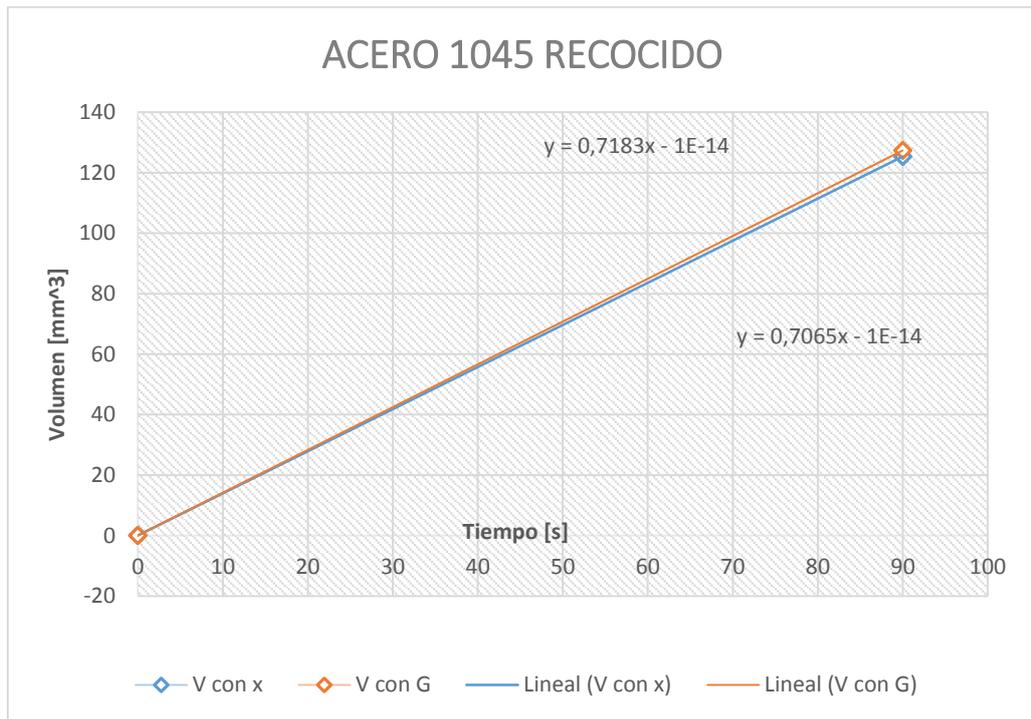


Figura 28: Gráfica tiempo vs volumen del Acero 1045 Recocido

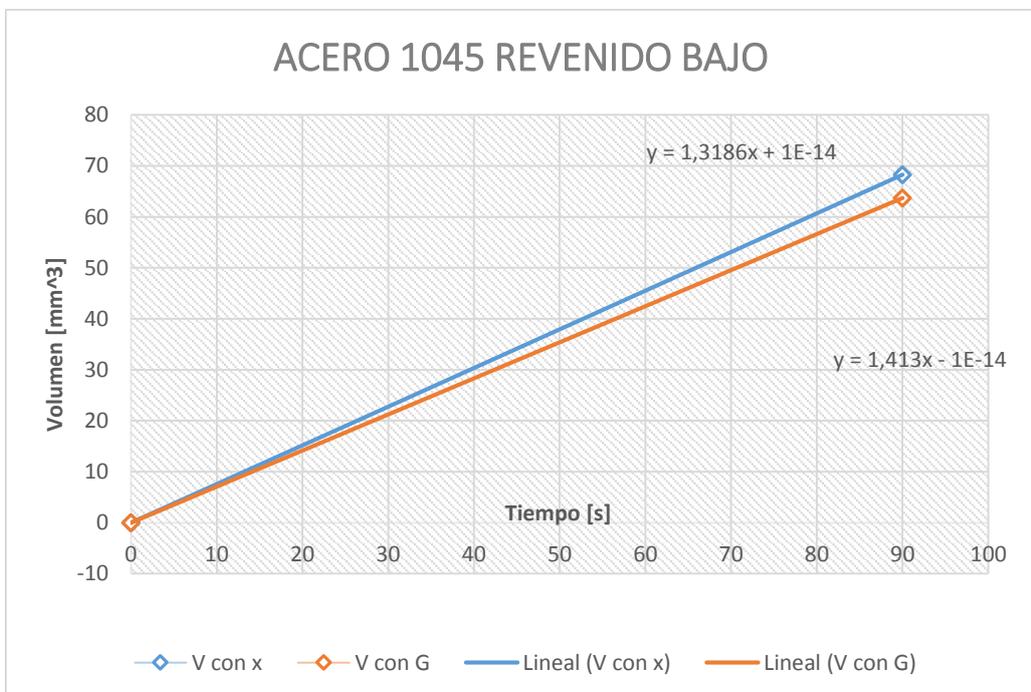


Figura 29: Gráfica tiempo vs volumen del Acero 1045 Revenido Bajo

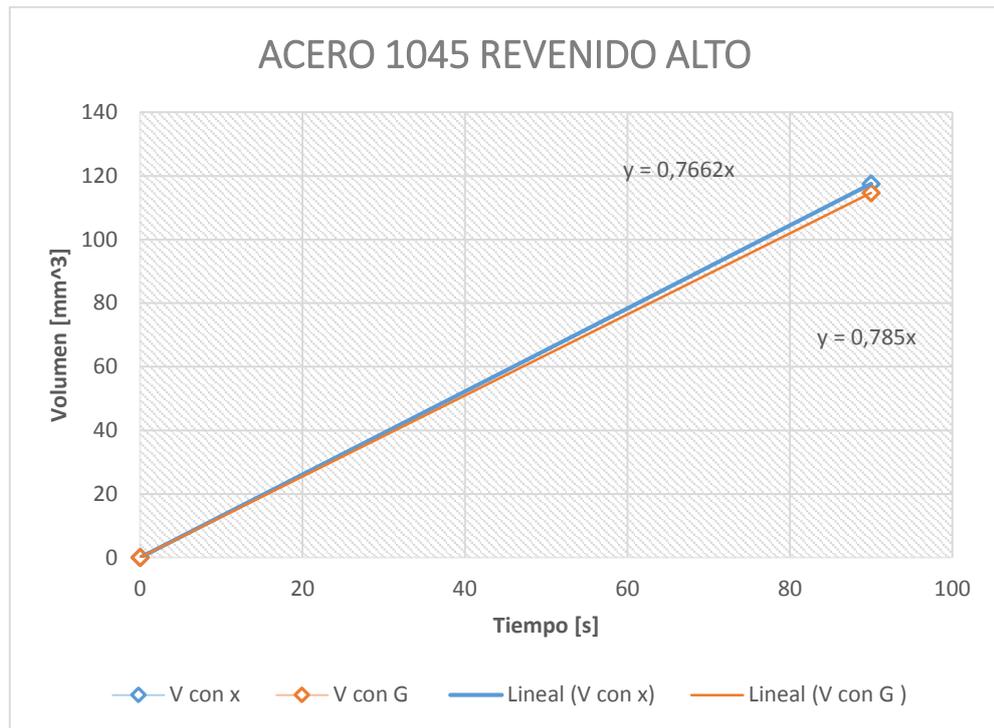


Figura 30: Gráfica tiempo vs volumen del Acero 1045 Revenido Alto

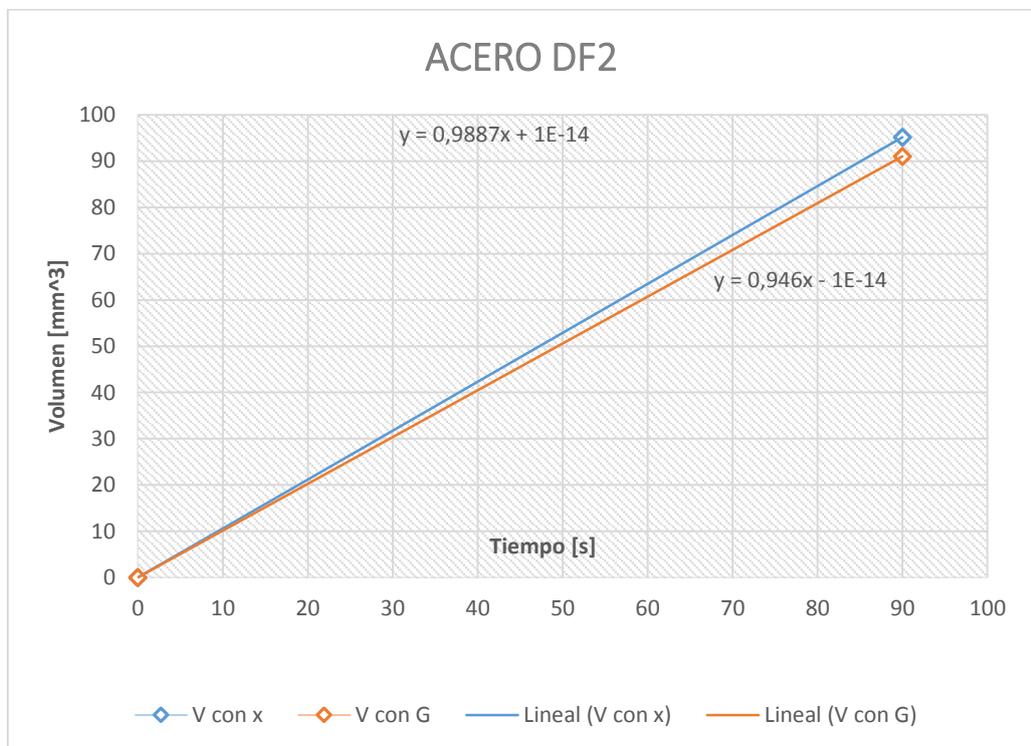


Figura 31: Gráfica tiempo vs volumen del Acero DF2

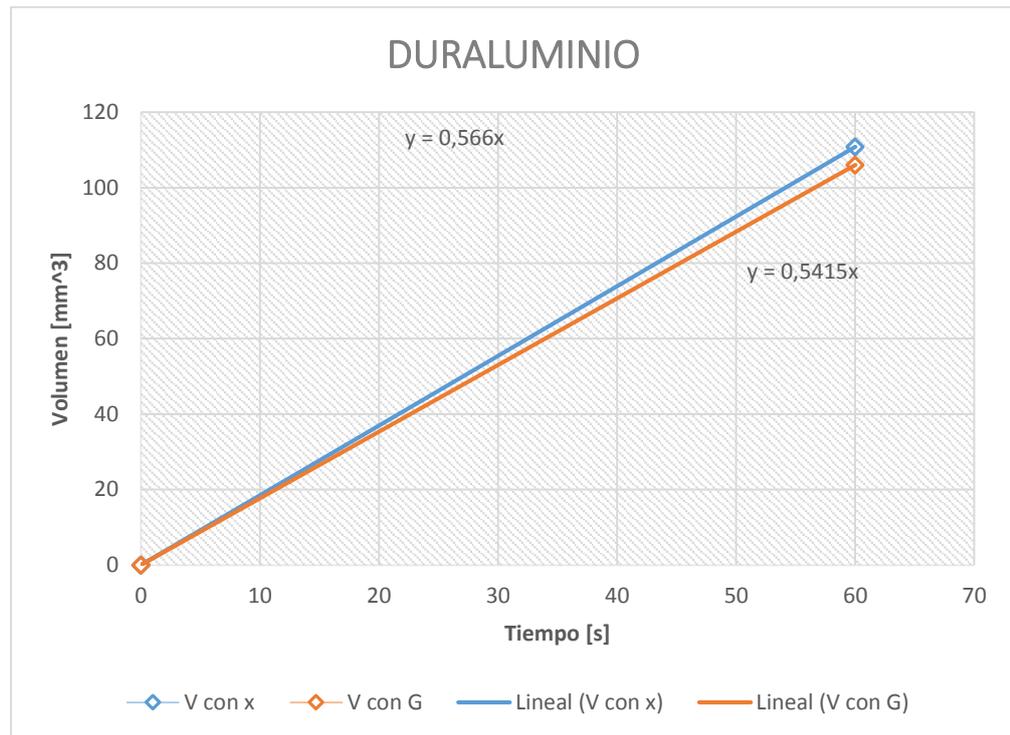


Figura 32: Gráfica tiempo vs volumen del Duraluminio

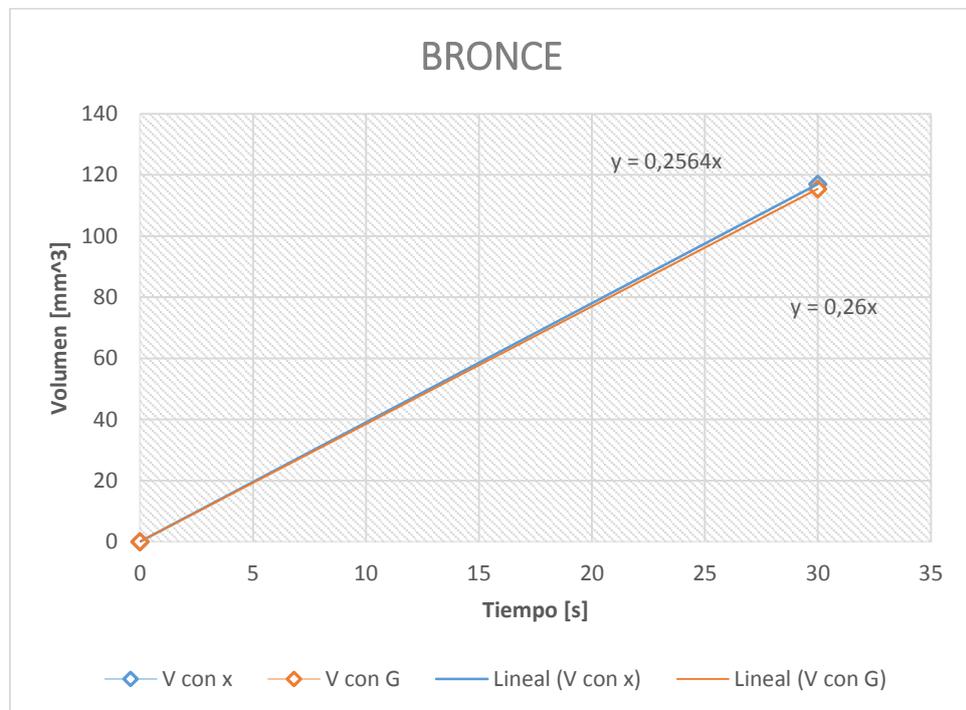


Figura 33: Gráfica Volumen vs tiempo del Bronce

### 4.2.3. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Se validaron los resultados obtenidos prácticamente de desgaste abrasivo para el acero 4340 frente a los resultados teóricamente tomados según la Tesis del egresado Jhonny Chávez “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA PARA MEDICIÓN DEL DESGASTE POR ABRASIÓN SEGÚN LA NORMA ASTM G-65”

Para el índice de desgaste se tomó la ecuación para volumen desgastado del libro de “Diseño de Máquinas y Herramientas de Robert L. Norton”

$$V = u \frac{P \cdot l}{H} \quad (11)$$

Dónde:

V = Volumen desgastado [mm<sup>3</sup>]

u = coeficiente de desgaste

P = Carga

l = longitud recorrida

H = Dureza Brinell del material

Para el coeficiente de desgaste se despejo “K” de la ecuación 11. Dando la siguiente ecuación.

$$u = \frac{V \cdot H}{P \cdot l} \quad (12)$$

La distancia recorrida para el caso práctico se la determinó con los siguientes datos aplicando los siguientes cálculos:

Rt = relación de transmisión motor-disco = 0,21

Dm = Diámetro motor = 43,3 mm

Dd = Diámetro disco = 205 mm

Dp = Diámetro probeta = 68 mm

W1 = RPM motor = 3320 rpm

W2 = RPM Disco

V2 = Velocidad tangencial probeta

t = tiempo del ensayo de desgaste en acero 4340 = 120 segundos

$$W2 = 3320 * Rt = 697,2 \approx 700 \text{ rpm}$$

$$700 \frac{\text{rev}}{\text{min}} * \frac{2\pi}{1\text{rev}} * \frac{1\text{min}}{60\text{seg}} = 73,3 \text{ rad/s}$$

$$V2 = W2 * \frac{Dp}{2} = 2492,33 \text{ mm/s}$$

$$l = V2 * t = 299079,6 \text{ mm}$$

$$l = 299089 \text{ mm}$$

Tabla 9: Validación Desgaste teórico vs práctico

	VALOR TEÓRICO SEGÚN NORMA ASTM G-65 PARA EL ACERO 4340	VALOR PRÁCTICO PARA ACERO 4340
Carga aplicada [N]	130	32
RPM	1000	700
Masa perdida [g]	0,38	1
Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	7,83	7,83
Volumen perdido [mm <sup>3</sup> ]	48,53	127,71
Volumen permitido segun Norma ASTM G- 65	49+/-2	-
Dureza BH	280	280
Longitud de deslizamiento [mm]	718000	299080
Índice de desgaste (u)	0,000146	0,003736

- El valor teórico tomado de la norma ASTM G-65 es menor que el obtenido prácticamente. También se puede observar como varían los parámetros involucrados para la determinación del índice de desgaste.
- Al usar un diferente material abrasivo el índice de desgaste “u” varía. En el caso de la norma ASTM G-65 se usa como abrasivo una rueda de caucho y un flujo de arena constante normados que no se deterioran, y en nuestro caso práctico se usó un abrasivo en lienzo de óxido de aluminio que se deteriora progresivamente con el tiempo y la aplicación de la carga. Este parámetro afecta directamente al índice de desgaste del material ya que es clave para su cálculo, de igual manera que lo es la dureza, la carga y la distancia recorrida.
- Las dimensiones de las probetas ensayadas influyen directamente con la distancia recorrida (tiempo) y el volumen desgastado del ensayo.
- La máquina de la norma ASTM G-65 usa una presión que no es constante ya que la superficie de aplicación de la carga varía desde el área de inicio, que depende de la dureza Shore de la rueda de goma, hasta el área final que también depende del diámetro de la rueda normada, el tiempo de ensayo y la propia resistencia al desgaste del material. En la máquina que usamos prácticamente se usa una presión constante de contacto plano en todo el ensayo.

### 4.3. DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS DE DUREZA MEYER Y EL DESGASTE ABRASIVO

#### 4.3.1. COEFICIENTE DE DESGASTE

A continuación se presenta la tabla 10 que involucra los parámetros del coeficiente de desgaste y las gráficas para relacionarlo con el índice de Meyer y la carga mínima de deformación.

Tabla 10: Coeficiente de desgaste "K" y relación "r"

MATERIAL	Tiempo t [s]	Volumen Desgastado con x [mm <sup>3</sup> ]	Coefficiente de desgaste K [mm <sup>3</sup> /s]	Relación (r)	Índice de Meyer "n"	Carga Mínima de deformación "Po" [kgf]
ACERO 1018	120	178,006	1,483	0,380	2,2433	129,867
ACERO 1045 RECOCIDO	90	125,298	1,392	0,357	2,1144	127,380
ACERO 1045 REVENIDO BAJO	90	68,255	0,758	0,194	1,9807	393,641
ACERO 1045 REVENIDO ALTO	90	117,458	1,305	0,335	2,1130	170,923
ACERO DF2	90	95,133	1,057	0,271	2,2504	147,639
DURALUMINIO	60	110,813	1,847	0,473	2,2483	125,864
BRONCE	30	117,027	3,901	1,000	2,2633	54,815

- Con el coeficiente de desgaste es posible obtener valores comparables entre los materiales ensayados. De tal manera que se puede observar que el metal que más se desgasta es el bronce y el duraluminio; y en los aceros el 1018, el 1045 recocido y el 1045 con revenido alto respectivamente. El metal con menor índice de desgaste o mayor resistencia al desgaste fue el acero 1045 con revenido bajo seguido del acero DF2.

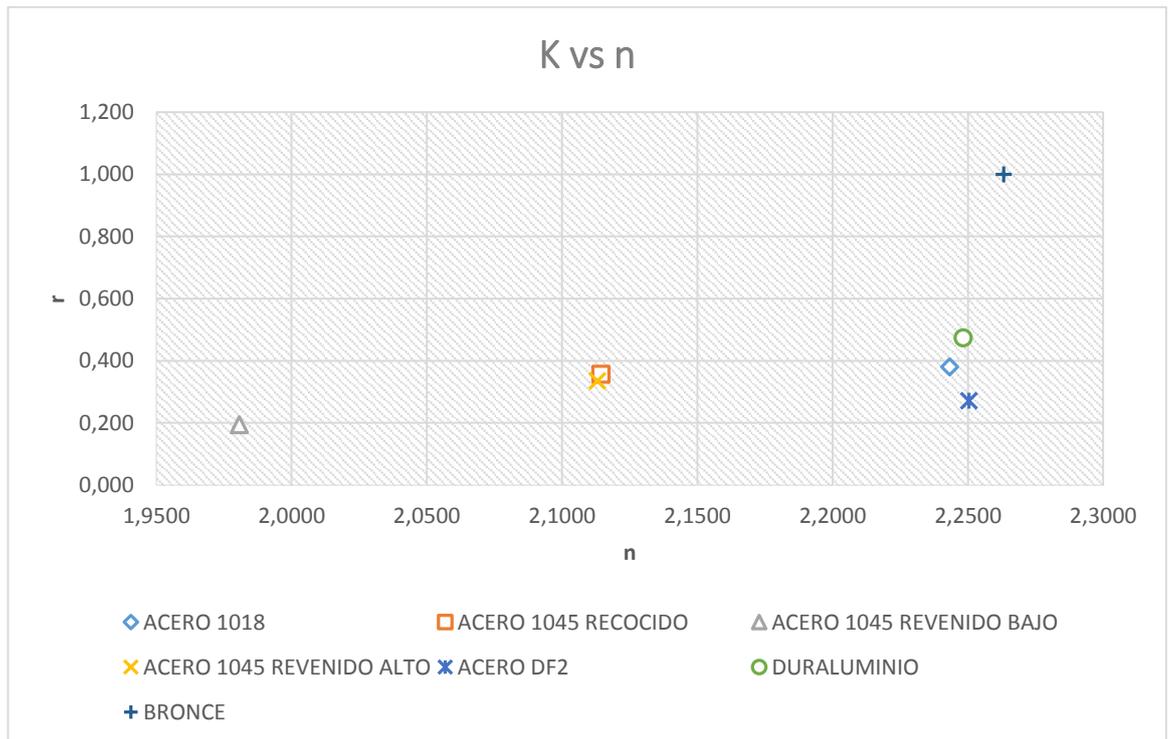


Figura 34: Correlación del Coeficiente de desgaste vs Índice de Meyer "n"

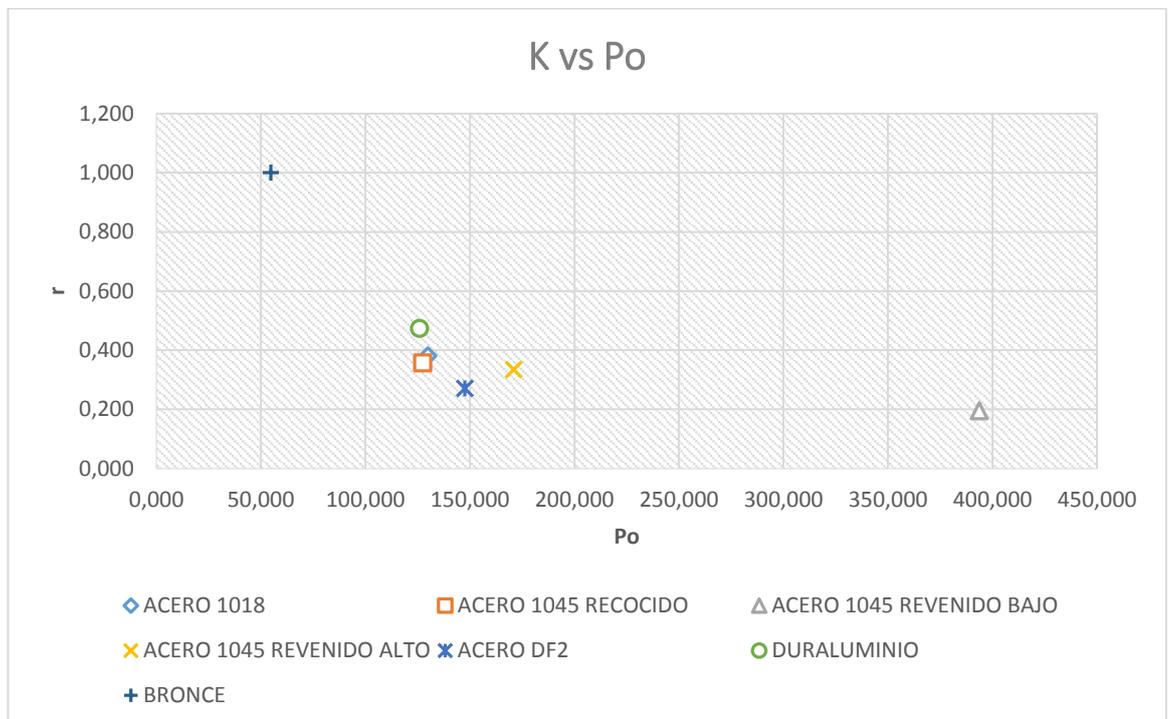


Figura 35: Correlación del Coeficiente de desgaste vs Carga Mínima de Deformación "Po"

### 4.3.2. DUREZA VS DESGASTE ABRASIVO

A continuación se presenta la tabla 11 para relacionar el coeficiente de desgaste y la dureza del material, seguido por las gráficas para cada metal.

Tabla 11: Dureza vs Desgaste Abrasivo

MATERIAL	Coefficiente de desgaste K [mm <sup>3</sup> /s]	Dureza Meyer HM	Dureza Brinell HB
Diámetro punzón=5mm y carga 750kgf			
ACERO 1018	1,483	203,401	193,356
ACERO 1045 RECOCIDO	1,392	174,945	164,808
ACERO 1045 REVENIDO BAJO	0,758	490,708	480,965
ACERO 1045 REVENIDO ALTO	1,305	239,171	229,206
ACERO DF2	1,057	231,386	221,407
DURALUMINIO	1,847	196,450	186,385
Carga 500kgf			
BRONCE	3,901	93,544	86,673



Figura 36: Gráfica Dureza vs Desgaste del Acero 1018



Figura 37: Gráfica Dureza vs Desgaste del Acero 1045 Recocido

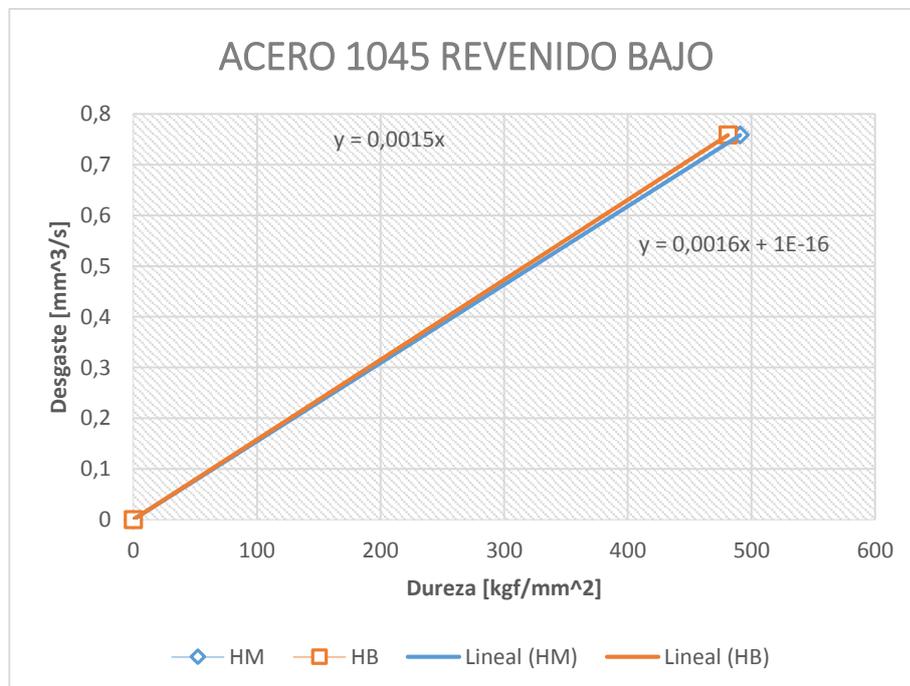


Figura 38: Gráfica Dureza vs Desgaste del Acero 1045 Revenido Bajo

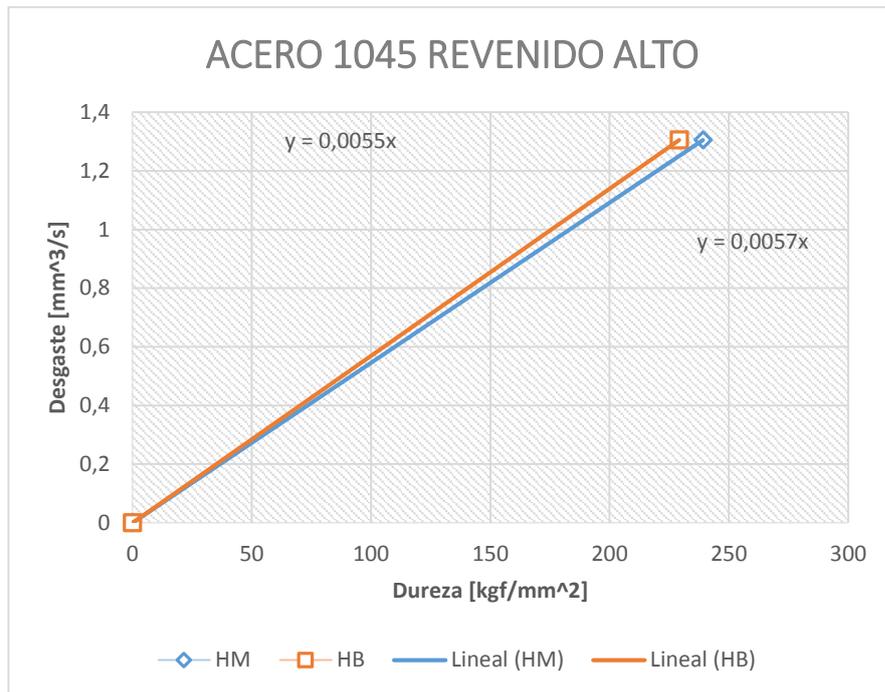


Figura 39: Gráfica Dureza vs Desgaste del Acero 1045 Revenido Alto

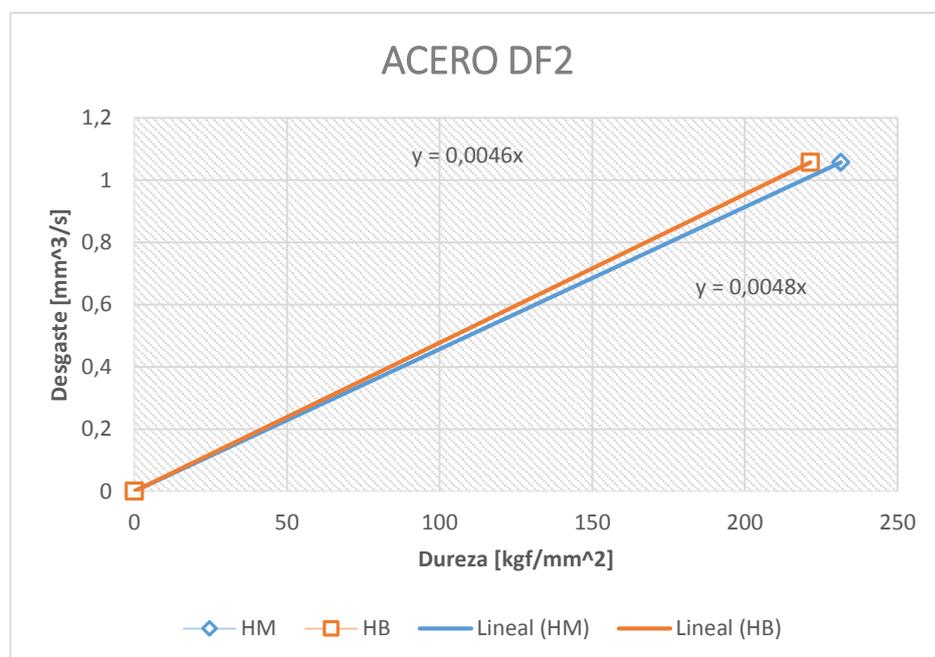


Figura 40: Gráfica Dureza vs Desgaste del Acero DF2

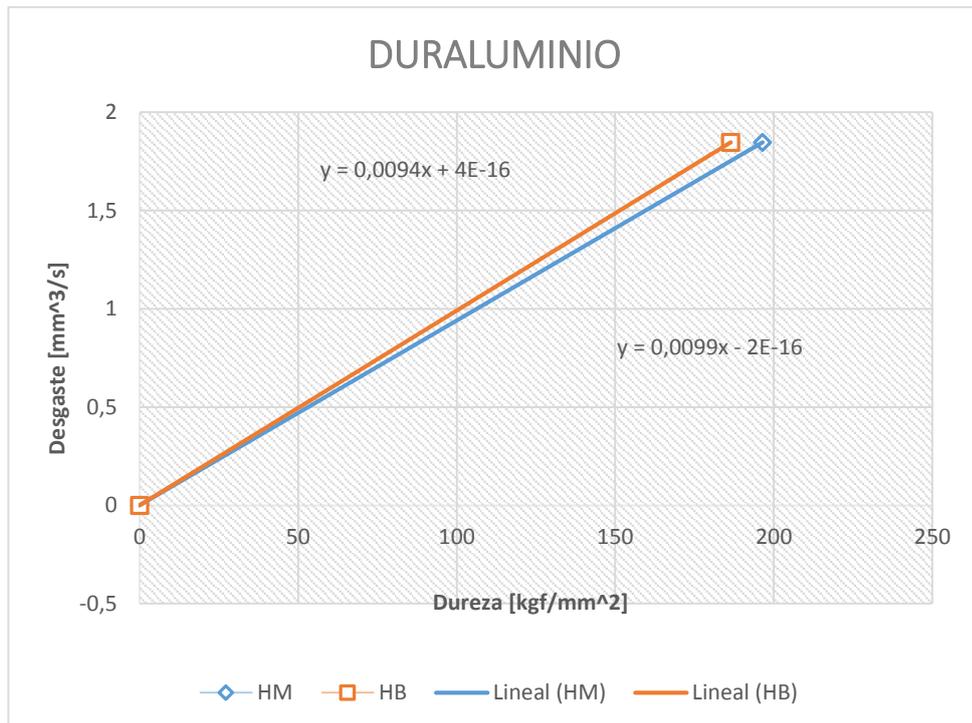


Figura 41: Gráfica Dureza vs Desgaste del Duraluminio

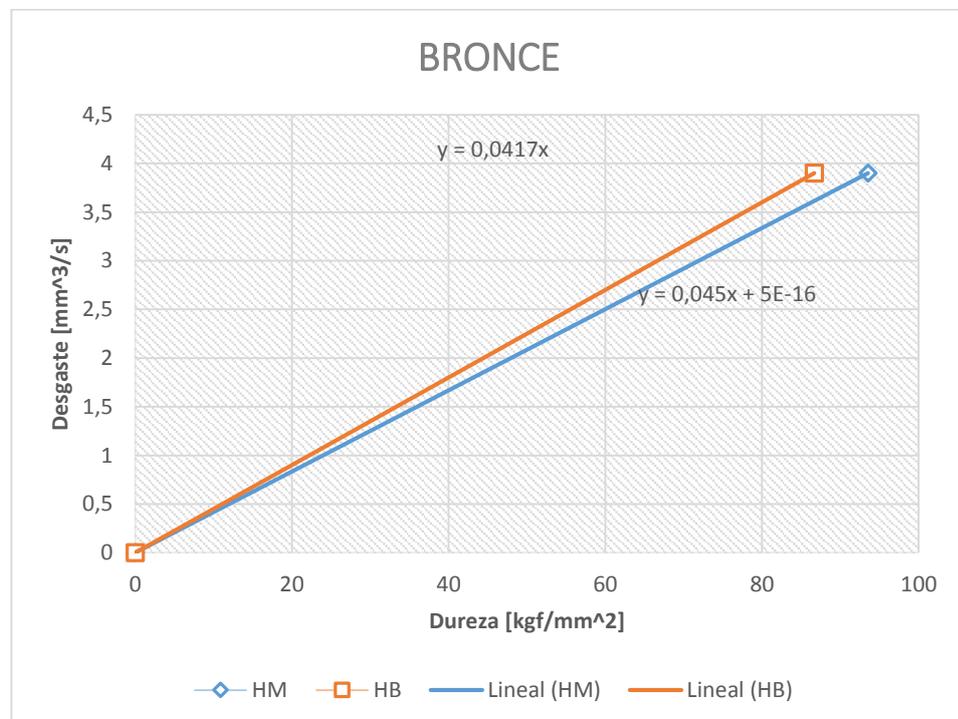


Figura 42: Gráfica Dureza vs Desgaste del Bronce

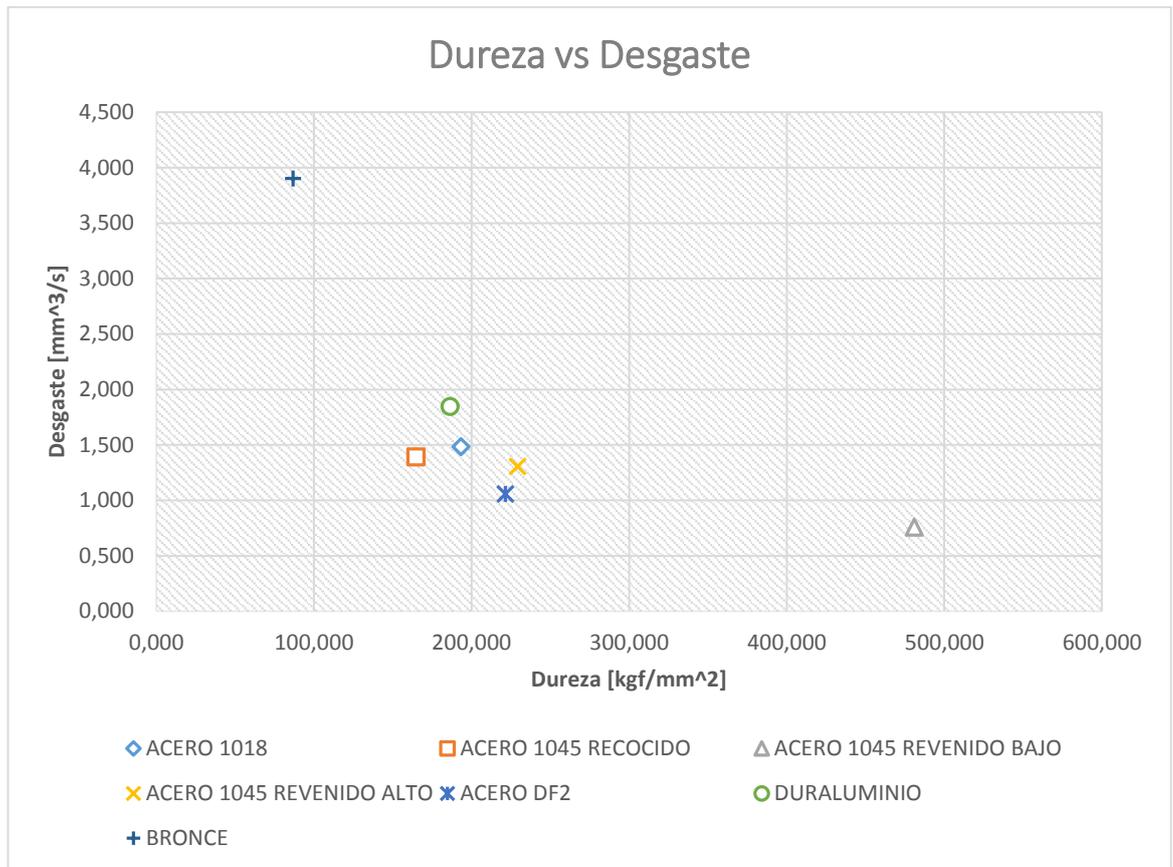


Figura 43: Correlación Dureza vs Desgaste

- El acero 1045 con revenido bajo presento la mayor dureza con el menor coeficiente de desgaste y el bronce la menor dureza con el coeficiente de desgaste mayor.
- El acero 1045 con sus tratamientos térmicos presentan un comportamiento lineal de que a mayor dureza mayor resistencia al desgaste, los demás metales tuvieron un comportamiento no uniforme.

## CAPÍTULO 5

### 5. ANÁLISIS ECONÓMICO

#### 5.1. COSTOS DIRECTOS

Mediante el análisis económico se determinó la factibilidad y rentabilidad del proyecto. Inicialmente se realizó la estimación económica del costo total del proyecto, detalla a continuación:

##### 5.1.1. MANTENIMIENTO E IMPLEMENTACIÓN

Tabla 12: Costos de mantenimiento

Ítem	Cant.	Descripción	V Unitario [USD]	V. Total [USD]
1	1	Mantenimiento	60	60
2	1	Implementación	80	80
<b>Total</b>				140

##### 5.1.2. DISEÑO E INGENIERÍA

Tabla 13: Tabla de costos de diseño e ingeniería

NOMBRES	Horas	SHI	Total [USD]
Luis Felipe Zambrano Moya	80	5	400
Phd. Leonardo Goyos	15	25	375
Ing. Víctor Andrade	2	25	50
Ing. Patricio Riofrío	2	25	50
<b>Total</b>			875

### 5.1.3. ADQUISICIÓN DE MATERIALES

Tabla 14: Costos de materiales

Ítem	Cant.	Descripción	V Unitario [USD]	V. Total [USD]
1	1	Barra de Bronce SAE 40 Ø ¾ pulg x 20 cm	8,68	8,68
2	1	Barra de Duraluminio Ø 40 mm x 25 cm	17,50	17,50
3	1	Barra de Acero 1045 Ø 25 mm x 50 cm	5,20	5,20
4	1	Barra de Acero DF2 Ø28 mm x 17 cm	3,49	3,49
5	1	Barra de Acero 1018 Ø ¾ pulg x 17 cm	0,95	0,95
6	1	Barra de Nylon Ø 50 mm x 10 cm	2,01	2,01
7	8	Lija para Hierro N50 Truper	0,70	5,60
8	1	Barra de Acero 4340 Ø 20 mm x 50 cm	3,20	3,20
<b>Total</b>				<b>46,63</b>

### 5.1.4. FABRICACIÓN DE ELEMENTOS

Tabla 15: Costos de fabricación de elementos

Ítem	Cant.	Descripción	V Unitario [USD]	V. Total [USD]
1	2	Portaprobeta de Nylon	17,5	35
2	6	Probeta de Acero DF2 Ø 19 mm x 12 mm	5	30
3	6	Probeta de Acero 1018 Ø19 mm x 12 mm	5	30
4	18	Probeta de Acero 1045 Ø 19 mm x 12 mm	5	90
5	6	Probeta de Bronce Ø 19 mm x 12 mm	5	30
6	6	Probeta de Duralumino Ø 19 mm x 12 mm	5	30
7	3	Probeta de Acero 4340 Ø 19 mm x 12 mm	5	15
<b>Total</b>				<b>260</b>

### 5.1.5. COSTOS DE ENSAYOS MECÁNICOS Y TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Tabla 16: Costos de ensayos mecánicos y tratamientos térmicos

Ítem	Cant.	Descripción	V Unitario [USD]	V. Total [USD]
1	28	Ensayo de Dureza Brinell	15	420
2	3	Tratamiento Térmico	100	300
3	392	Medición de Diámetro	2,50	980
4	8	Ensayo de Desgaste Abrasivo	20	160
<b>Total</b>				<b>1860</b>

## 5.2. COSTOS INDIRECTOS

Son los costos que afectan la realización del proyecto pero no se incluyen físicamente, además no son fácilmente identificables y cubren los costos de investigación, oficina, desarrollo, tecnología, capacitación entre otros.

### 5.2.1. SUMINISTROS Y SERVICIOS

Tabla 17: Costos de suministros y servicios

<b>SUMINISTROS Y SERVICIOS</b>				
Ítem	Cant.	V. Unitario [USD]	Total [USD]	
Transporte	10	10	100	
Internet	500	0,10	50	
Impresiones	500	0,10	50	
Útiles de oficina	1	100	100	
Herramientas varias	1	350	350	
Servicios Básicos (mes)	4	25	100	
<b>Total</b>			<b>750</b>	

### 5.2.2. ASESORAMIENTO

Tabla 18: Costos de asesoramiento del proyecto

<b>ASESORAMIENTO</b>			
<b>Ítem</b>	<b>Horas</b>	<b>HSI</b>	<b>Total USD]</b>
<b>Asesoramiento Técnico</b>	10	25	250
<b>Horas de tutoría</b>	20	20	400
		<b>Total</b>	650

### 5.3. COSTOS TOTALES DEL PROYECTO

Tabla 19: Tabla de costos totales

<b>COSTOS TOTALES</b>	
<b>COSTOS DIRECTOS</b>	
<b>Ítem</b>	<b>Total [USD]</b>
<b>Mantenimiento e implementación</b>	140
<b>Diseño e ingeniería</b>	875
<b>Adquisición de materiales</b>	46,63
<b>Fabricación de elementos</b>	260
<b>Ensayos mecánicos y tratamientos térmicos</b>	1860
<b>COSTOS INDIRECTOS</b>	
<b>Suministros y servicios</b>	750
<b>Asesoramiento</b>	650
<b>Total</b>	4581,63

### 5.4. BENEFICIOS OBTENIDOS CON EL PROYECTO

Mediante la determinación de la correlación se puede estimar mediante un ensayo muy simple de dureza que material o que tratamiento térmico es el más conveniente para resistir el desgaste. También se consigue una optimización del tiempo al aplicar la correlación y no realizar el ensayo de desgaste abrasivo normal.

Además se puede analizar el comportamiento de los materiales estudiados para dar un adecuado mantenimiento y/o reparación.

## CAPÍTULO 6:

### 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. CONCLUSIONES

- Los tratamientos térmicos de recocido, templado, revenido alto y revenido bajo que se realizaron a las probetas de acero 1045 normalizado en el laboratorio de Ciencia de Materiales, lograron modificar de manera adecuada las propiedades de dureza del material para los posteriores ensayos de dureza. Ya que la dureza en su estado normalizado fue de 220 HB y con los tratamientos térmicos se obtuvieron durezas mayores y menores según el tratamiento que se aplicó.
- Mediante la determinación del índice de Meyer “n” se pudo encontrar una correlación creciente frente al coeficiente de desgaste “K” para los aceros 1045 y 1018 ensayados y sus respectivos tratamientos térmicos, ya que a mayor desgaste del material o a menor resistencia a este, la capacidad de endurecimiento por deformación indicada por el índice de Meyer aumenta. Esta correlación o comportamiento creciente también se cumple para los casos del Duraluminio y del Bronce. El acero DF2 presenta un comportamiento diferente a los demás aceros, esto se da ya que al pertenecer a una familia diferente de aceros posee una composición y microestructura distinta que los acero 1018 y 1045, por lo tanto no presenta propiedades de dureza y desgaste muy similares.
- Mediante la determinación de la carga mínima de deformación “Po” se encontró una correlación negativa lineal o inversamente proporcional al coeficiente de desgaste para el acero 1045 y sus tratamientos térmicos con una pendiente baja. Este comportamiento fue más pronunciado

para los demás metales ensayos. Se debe tener en cuenta que  $P_o$  es un indicador directo de la plasticidad del material, ya que en la curva carga vs deformación,  $P_o$  es la carga donde termina el comportamiento lineal o elástico y comienza la deformación plástica. Es decir a mayor  $P_o$  la plasticidad del material disminuye de igual forma que el desgaste, ya que el desgaste abrasivo es fundamentalmente un proceso de penetración y corte para la remoción de material.

- Se encontró una correlación lineal negativa similar a la encontrada para “ $P_o$ ” para el acero 1045 y sus tratamientos térmicos, de manera que a mayor dureza su resistencia al desgaste es mayor. Este comportamiento no se repitió para los demás metales ensayados, ya que se obtuvieron comportamientos no uniformes entre la dureza y el desgaste abrasivo del material. Por lo cual se concluyó que la dureza no es un parámetro que está directamente relacionado con el desgaste abrasivo del material por lo cual no se encuentra una correlación definida.
- Se pudo garantizar la medición del volumen desgastado mediante la comparación entre el método gravímetro (por peso) y el geométrico (por medida), ya que se obtuvieron valores similares con un rango de error mínimo producto de las densidades tomadas teóricamente de la literatura y de la falta de una mayor apreciación en la balanza electrónica para una más exacta medida de peso.
- La validación entre los valores obtenidos prácticamente en la presente tesis no coincidieron con los valores teóricos tomados de la Norma ASTM G-65 por la considerable variación de los parámetros que afectan directamente al desgaste abrasivo del material.

- La máquina de la norma ASTM G-65 usa un proceso autodependiente, ya que el área en la que trabaja la arena va aumentando según el desgaste que produzca la rueda en la muestra y por lo tanto se disminuye la presión aplicada y el desgaste. En la máquina que se usó prácticamente se usa una presión constante de contacto plano en todos los ensayos.
- Los valores de índice de desgaste abrasivo varían dependiendo del método que se emplee y las variantes que puedan intervenir en estos. Por lo cual no son directamente comparables unos con otros.

## **6.2. RECOMENDACIONES**

- Es importante, al momento de realizar las mediciones, el correcto uso del microscopio de herramientas para obtener una clara visualización de la muestra y apreciar de manera precisa los bordes de las huellas y sus dimensiones.
- Por seguridad se debe tomar tres mediciones por muestra para asegurar que es la medida correcta. Este procedimiento se lo debe realizar para todo tipo de medición.
- Se debe tomar en cuenta que cada muestra o que cada material tiene diferentes propiedades mecánicas por lo cual se debe considerar los parámetros que afectan directamente a estas propiedades y usarlos individualmente para un resultado correcto.
- Cuando se realizan ensayos para distintos tipos de materiales que se quiere analizar, se debe usar los mismos parámetros para facilitar la comparación entre ellos.
- Se debe profundizar más en este tipo de investigaciones, de manera que se hagan más ensayos y prácticas en esta área. Y de tal forma que se aprovechen los equipos que la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE" dispone y están a disposición de los estudiantes

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] K.H. Zum-Gahr, G.T. Eldis, *Wear* 64 (1980) 175-194.
- [4] K.H. Zum-Gahr, *Wear* 124 (1988) 87-103.
- [5] G. Berg, P. Grau, *Cryst. Res. Tech.* 32 (1997) 149-154.
- [6] S. Riveros, *Aceros antiabrasivos. Medición del Índice de Endurecimiento Meyer y predicción del endurecimiento adicional en uso según técnica de Tabor.*, Conamet/SAM, 2004.
- [7] D. Tabor (Ed.) *The Hardness of Metals*, Oxford University Press, New York, 1951.
- [8] G. Dieter (Ed.) *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill, 1988, p. 766.
- [9] Jordi Renedo, *Comportamiento al desgaste por deslizamiento en aceros inoxidables: Ferrítico, Austenítico, Dúplex y Martensítico.*
- [10] T.S. Eyre, *Wear Characteristic of Metals*
- [11] E.J. López, *Estudio experimental del desgaste abrasivo en acero AISI 8620, D-2 y H-12 con y sin tratamiento superficial.*
- [12] G. Castro, *Historia y evolución del acero. Proceso de producción del acero (2009).*
- [13] *Metalografía*, Universidad Tecnológica de Pereira.
- [14] *Metalografía y tratamientos térmicos*, Material didáctico de la Facultad Regional de la Universidad Tecnológica Nacional del Rosario.
- [15] J. Garavito, *Tratamientos Térmicos Protocolo. Curso de Materiales*, Facultad de Ingeniería Industrial de la Escuela Colombiana de Ingeniería.
- [16] *Estudio comparativo entre los resultados obtenidos en diversos Ensayos Tribológicos para la Medición del Comportamiento frente al Desgaste Abrasivo de Materiales*, Tesis Doctoral de Laura Ferreiro.
- [17] *Curso de Materiales II, Enseñanzas técnicas virtuales del Departamento de Construcción y Agronomía de la Universidad de Salamanca.*

## **ANEXOS**

**ANEXO A**  
**PLANOS PROBETAS Y PORTABROBETAS**

**ANEXO B**  
**TABLAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**