

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE ADHESIVO DE
MATERIALES POR MEDIO DE LA NORMA ASTM G83-96**

JESÚS DAVID VAN-STRAHLEN CASALINS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS
MATERIALES
BUCARAMANGA
2004**

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE ADHESIVO DE
MATERIALES POR MEDIO DE LA NORMA ASTM G83-96**

JESÚS DAVID VAN-STRAHLEN CASALINS

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Metalúrgico.

**Director
DARÍO YESID PEÑA B.
Ph D. en Corrosión**

**Codirector
SANDRO BAEZ PIMIENTO
Ingeniero Metalúrgico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS
MATERIALES
BUCARAMANGA
2004**

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	14
1. OBJETIVOS	15
1.1 OBJETIVO GENERAL	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2. JUSTIFICACIÓN	16
3. ALCANCES DEL PROYECTO	17
4. MARCO TEÓRICO	18
4.1 TRIBOLOGIA	18
4.2 FRICCIÓN	18
4.2.1 Interacción de las superficies.	19
4.2.2 Interacción molecular.	20
4.2.2.1 Componente molecular de la fricción.	21
4.2.3 Interacción mecánica.	22
4.2.3.1 Componente mecánico de la fricción.	23
4.3 PERFIL ADHESIVO	24
4.3.1 Desgaste adhesivo.	25
4.4 CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO DE DESGASTE	26
4.5 COEFICIENTE DE FRICCIÓN	27
4.6 CAMBIOS O DAÑOS PRODUCIDOS POR LA FRICCIÓN	31
4.6.1 Clasificación de los daños producidos por la fricción.	33
4.7 ACEROS DE BAJA ALEACIÓN	34
4.7.1 Efectos del cromo.	35
4.7.2 Efectos del molibdeno.	36
4.8 FUNDICIONES BLANCAS ALEADAS AL CROMO	36
4.8.1 Efectos del Cromo en las fundiciones.	37
4.8.2 Efectos del Molibdeno.	38
4.8.3 Efectos del Niobio.	39
4.8.4 Efectos del V.	39
4.9 ESTADO DEL ARTE	39
4.9.1 Estado y Condiciones de trabajo previos a las modificaciones y acondicionamientos realizados en éste trabajo.	40

4.10 MÉTODO ESTÁNDAR PARA LA PRUEBA DE DESGASTE CON UNA MÁQUINA DE CILINDROS CRUZADOS (NORMA ASTM G83-96)	43
5. DESARROLLO EXPERIMENTAL	45
5.1 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS	45
5.2 METALOGRAFIA	46
5.3 PUESTA A PUNTO DE LA MÁQUINA DE CILINDROS CRUZADOS	48
5.4 PROCEDIMIENTO PARA LA EJECUCIÓN DEL ENSAYO DE DESGASTE	48
6. RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS REALIZADOS	50
6.1 PERFILES DE DESGASTE	50
6.2 COEFICIENTES DE FRICCIÓN	53
6.3 CONFIABILIDAD DE LOS DATOS	54
6.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS	54
7. RECONSTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA DE CILINDROS CRUZADOS	57
7.1 CAMBIOS REALIZADOS	57
7.2 PLANO DE LOS CAMBIOS REALIZADOS	58
7.2.1 Estado de la máquina de cilindros cruzados después de realizar las modificaciones y acondicionamientos.	60
8. APORTE DEL PROYECTO	63
CONCLUSIONES	64
RECOMENDACIONES	66
BIBLIOGRAFIA	67
ANEXOS	69

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Contacto sucesivo entre asperezas y superficies al Elevarse la carga.	20
Figura 2. Desgaste entre dos y tres cuerpos	25
Figura 3. Desgaste W en función del tiempo de operación t.	27
Figura 4. Variación con el tiempo de las rugosidades de las superficies en contacto.	31
Figura 5. Tipos de Perturbaciones en el enlace de fricción	33
Figura 6. Tribómetro de cilindros cruzados (vista total)	41
Figura 7. Tribómetro de cilindros cruzados (vista parcial)	42
Figura 8. Micrografías de los materiales ensayados	46
Figura 9. Perfil de desgaste del acero de baja aleación "A" al cromo (0.2% C, 2% Cr)	51
Figura 10. Perfil de desgaste del acero de baja aleación "B" al cromo. (0.75%C, 8% Cr, 0.5% Mo, 0.5%V)	51
Figura 11. Perfil de desgaste de la función "C" al cromo (4.5%C, 29% Cr, 0.7 Mo, 1.3%V)	52
Figura 12. Perfil de desgaste de la fundición "D" al cromo. (5%C, 23% Cr, 8.5% Mo, 6% Nb, 1.3% V, 6%W)	52
Figura 13. Perfil comparativo de los materiales sometidos a la prueba.	53
Figura 14. Plano de los cambios realizados	58

Figura 15. Tribómetro de cilindros cruzados, vista total	60
Figura 16. Tribómetro de cilindros cruzados, vista parcial	61

LISTA DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1.	Parámetros de prueba para el tribómetro utilizado.	41
Tabla 2.	Parámetros de prueba según la norma	44
Tabla 3.	Composición nominal de las probetas	46
Tabla 4.	Propiedades de los materiales utilizados.	50
Tabla 5.	Coefficientes de fricción experimentales	53
Tabla 6.	Gastos generados por la reconstrucción de la máquina de cilindros cruzados.	62

LISTA DE ANEXOS

- Anexo A. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS COMO LO EXIGE LA NORMA ASTM G 83-96
- Anexo B. REPORTE DE DATOS DE PERDIDA DE PESO SUFRIDA DURANTE LOS ENSAYOS
- Anexo C. REPORTE DEL MANEJO ESTADÍSTICO UTILIZADO EN LA DETERMINACIÓN DE DUREZAS.

Dedico este logro a mis abuelos maternos CARMEN FONTALVO y JAIME CASALINS, a mi madre YORYANIS CASALINS, a mi hermano JAISEN VASQUEZ, a mi tía materna YENIS CASALINS, a mi tío materno GUILLERMO CASALINS y a mi novia IRONÚ MARTINEZ; en virtud a su incondicionalidad y oportuno apoyo económico y moral.

Jesús David

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

A El virtuoso creador de los sueños que hacen grandes a los hombres y que posa sobre sus iris la magia de su luz.

A mi familia por su afable y oportuno apoyo.

A la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales y a sus respectivos miembros, por su deferencia y colaboración en la consecución de este trabajo.

A la Universidad Industrial de Santander, y a todos los integrantes de esta gran familia, por formarme y acogerme en su seno.

Al Ingeniero DARIO YESID PEÑA (Director) y al Ingeniero SANDRO BAEZ (Coodirector), por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo bajo su dirección.

A los Técnicos AMBROSIO, DANIEL, FERMIN, JAVIER, MARIO y WILSON por su colaboración y atención oportuna.

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE ADHESIVO DE MATERIALES POR MEDIO DE LA NORMA ASTM G 83-96.*

AUTOR: VAN-STRAHLEN CASALINS, Jesús David.**

PALABRAS CLAVES: Tribología, fricción, desgaste, coeficiente de fricción, tribosistema.

DESCRIPCIÓN:

Esta investigación presenta estudios en la evaluación del desgaste adhesivo y coeficientes de fricción de unos materiales tratados con recubrimientos duros por soldadura; son éstos dos aceros de baja aleación, uno de ellos solo con cromo y otro con cromo, vanadio y molibdeno, y dos fundiciones blancas aleadas al cromo, una de ellas con molibdeno y vanadio y la otra con Molibdeno, Niobio, Vanadio y Tungsteno; los ensayos se realizaron por medio de un tribómetro, bajo la norma ASTM G83 – 96.

El trabajo tiene como objetivo estimar el perfil de desgaste adhesivo y coeficiente de fricción de los materiales anteriormente expuestos y mejorar las condiciones de trabajo del tribómetro, ya sea mejorando los accesorios existentes o implementándole otros. Para su realización fue necesario llevar las probetas a unas dimensiones y rugosidad específica; según señala la norma y para ello fue necesario, teniendo en cuenta la relativa elevada dureza de los recubrimientos y su gran irregularidad; desbastar en primera instancia con esmeril y luego efectuar la rectificación en piedra. Se emplearon dos de los tres procedimientos contenidos en la norma, teniendo en cuenta el respectivo material con el cual se adelanta el desarrollo de los ensayos.

Se obtuvo un coeficiente de variación máximo de 10%, lo que indica una buena correlación en los datos. Los coeficientes de fricción calculados, son considerados acertados puesto que sus valores corresponden a los establecidos en la literatura y de igual forma, con los perfiles de desgaste.

* Investigación

** Facultad de Ingeniería Físico-química, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los materiales.
Director del Proyecto Darío Yesid Peña.

SUMMARY

TITLE: EVALUATION OF ADHESIVE WEAR RESISTANCE OF MATERIALS BY USING ASTM G 83-96 STANDARD*.

AUTHOR: VAN-STRAHLEN CASALINS, Jesús David**.

KEY WORDS: Tribology, Friction, Wear, Friction Coefficient, Tribosistem.

ABSTRACT:

This research presents studies in the adhesive wear and friction coefficient evaluation of materials obtained by hard coating welding; one of the steels was an low alloy with Cr and the other with Cr – V – Mo, and two white cast iron alloys one of them with Cr – Mo – V and the another with Mo – Nb – V – W. The tests were to carry out by using the crossed cylinder machine, under the standard ASTM G 83-96.

The aims of this research was, to describe the wear profiles and to determine the friction coefficient of these materials before mentioned and besides, to improve the conditions of the tribometer machine, making adjustments or implanting another changes and accessories.

Specimens were cut and polished by using emery paper (600) until to get a surface roughness specific according to the standard. A and C procedures of the standard G 83-96 was used for the materials testing due to their hardness.

In this work a maximum variation of coefficient of 10% was calculated indicating a very good accuracy. The coefficients of friction calculated were in good agreed with the obtained in another works as well as, the wear profiles for each materials tested in the crossed cylinder machine.

* Investigation

** Faculty of Engineering physical-chemistry. School of Engineering Metallurgic and Science of the materials.
Director of Project: Darío Yesid Peña

INTRODUCCIÓN

En la industria existen múltiples equipos que han sido concebidos para cumplir con funciones específicas, muchas de esas funciones requieren que una o más de las piezas que componen estos equipos sean sometidas a condiciones extremas de temperatura, presión, fricción y medios agresivos entre otros.

Cuando dos o más materiales son puestos en contacto directo para interactuar en condiciones dinámicas, conforman un sistema que es influenciado por las propiedades físicas de ambos, las fuerzas con las que interactúan y el medio en donde se encuentran; las fuerzas de interacción son difícilmente regulables, a no ser por el diseño; sin embargo las propiedades físicas pueden ser mejoradas a través de una adecuada selección del material y el medio puede verse favorecido por la presencia en la interfase de capas aislantes como los lubricantes, a fin de lograr un buen funcionamiento y mayor durabilidad del sistema bajo la premisa de disminuir al máximo el área de contacto entre las microirregularidades superficiales.

En este trabajo se establece una evaluación del comportamiento adhesivo de dos aceros de baja aleación y dos fundiciones blancas aleadas al cromo; todos tratados con recubrimientos duros por soldadura y evaluados por medio de la norma ASTM G 83-96 a través de la determinación del coeficiente de fricción y perfil adhesivo de los respectivos materiales, por medio de una máquina de cilindros cruzados.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar el comportamiento adhesivo de dos fundiciones blancas al cromo y de dos aceros de baja aleación, en una máquina de cilindros cruzados.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar la resistencia al desgaste adhesivo de los materiales, por medio de una máquina de cilindros cruzados.
- Determinar el coeficiente de fricción y el perfil adhesivo de los materiales expuestos en una máquina de cilindros cruzados.

2. JUSTIFICACIÓN

En el mundo moderno, la competitividad tanto económica como de calidad y de funcionalidad se hacen imperativas para la permanencia en el mercado de cualquier artículo, la selección, evaluación y viabilidad económica de los materiales.

A partir de ello y bajo estándares, se hace indispensable la aparición de trabajos que aporten resultados comparativos y descriptivos de las propiedades de los materiales. Es así como en este trabajo se pretende evaluar un aspecto de mucha importancia a nivel tecnológico y académico, representado en las propiedades de resistencia al desgaste adhesivo de los materiales.

La universidad además de cubrir con las necesidades académicas intenta prestar algunos servicios a la industria con el fin de optimizar algunos de los procesos que se realizan en éstas; es por ello que se hace necesario la evaluación, comparación y la adopción de técnicas que permitan mejorar las condiciones operativas de los sistemas dinámicos en contacto directo (tribosistemas).

3. ALCANCES DEL PROYECTO

Este proyecto tiene como finalidad la evaluación vía experimental del desgaste adhesivo que sufre un metal al ponerse en contacto con otro metal, bajo condiciones dinámicas; mediante una máquina de cilindros cruzados.

Tras la ejecución de los ensayos y la obtención de los respectivos resultados se podrá comparar cada uno de los materiales ante las condiciones de desgaste adhesivo y de esta forma determinar su verdadero potencial.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 TRIBOLOGIA

“Es la ciencia y tecnología generada por las superficies que están en contacto y movimiento relativo, así como los fenómenos que de ellos se derivan”, de tal forma que hacen parte de su área de estudio la fricción, el desgaste y la lubricación.

Existen avances tecnológicos de métodos que permiten simular los diversos mecanismos de fricción y el desgaste que han dado pie para la elaboración de los tribómetros, ellos son:

- Máquina de cilindros cruzados.
- Máquina de perno sobre disco.
- Máquina de líquidos impactantes.
- Máquina de perno y película abrasiva.
- Máquina de arena y disco plástico.¹

4.2 FRICCIÓN

Desarrollo de una condición sobre la superficie de rozamiento de dos o más piezas en contacto donde la cercanía excesiva entre puntos sobresalientes, da como resultado soldadura localizada, con el subsecuente desgaste y una formación más áspera de la superficie,² es

¹ VITE TORRES, M. Necesidad de la enseñanza de la tribología en los programas de ingeniería de las universidades públicas de México. México, 1994. Pág. 36.

² AVNER, H. Sydney. Introducción a la metalurgia física. México, Mc Graw-Hill, 1961. Pág. 673.

decir se da una pérdida gradual de energía cinética en situaciones donde los cuerpos o sustancias se mueven relativamente unas con otras y se describe como la resistencia al movimiento de un cuerpo, cuando éste se desplaza sobre otro. La fricción se denomina aerodinámica cuando se produce entre un sólido y un gas, líquida cuando se produce entre un líquido y un sólido e interna cuando se produce por procesos de disipación de energía.

4.2.1 Interacción entre superficies. En los procesos tribológicos es esencial considerar no sólo la interacción entre sólidos, sino también la de éstos con el medio ambiente, lo cual puede variar totalmente las propiedades de las superficies.

Los dos principales procesos que tienen lugar en la superficie de fricción (o sea, la formación de puntos de contactos que surgen de la penetración mutua de las asperezas y la formación en estos contactos de “puentes soldados”) ocurren bajo grandes presiones locales. Estas presiones son suficientemente grandes aún cuando la carga total en el par deslizante sea pequeña, ya que el área total de los puntos de contacto es muy pequeña.

Como la rugosidad presenta diferentes niveles, al elevarse la carga, las asperezas más salientes van entrando en contacto sucesivo (observar la figura 1); el incremento en el área real de contacto se produce debido al aumento del número de puntos de contacto y no dependiendo de las dimensiones de estos puntos.³

³ MARTINEZ, P. Francisco. La tribología, ciencia y técnica para el mantenimiento. Limusa. México, 1997. Pág. 12.

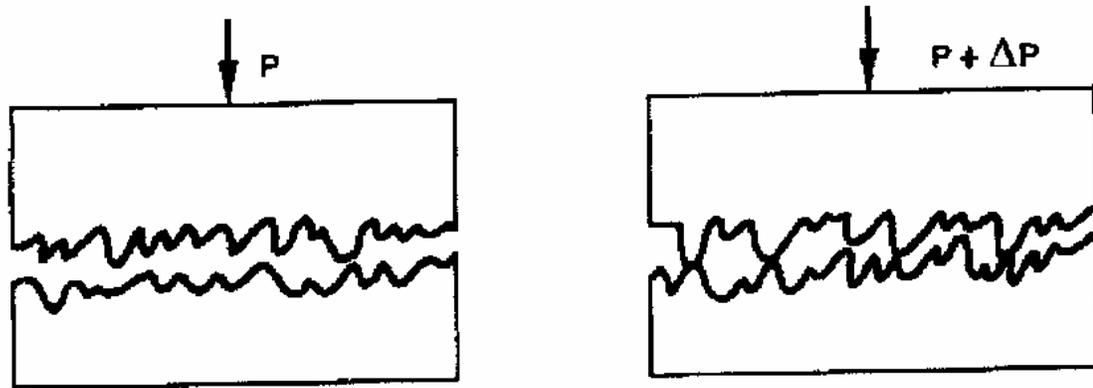


Figura 1. Contacto sucesivo entre asperezas y superficies al elevarse la carga P (a) a $P + \Delta P$ (b).

4.2.2 Interacción molecular. En las superficies de los sólidos, los átomos o moléculas presentan un estado de no equilibrio y una elevada energía superficial que genera una activa interacción entre la superficie del sólido y los átomos o moléculas del medio gaseoso, líquido o sólido en contacto con aquella. Al unirse dos superficies en los puntos de contacto real se libera una cantidad importante de energía superficial.

En los sólidos, para formar las áreas de contacto, debe hacerse una cantidad de trabajo, el cual generalmente es mayor que la energía superficial liberada. De esta forma el proceso de soldadura en frío no es espontáneo. Se llama “enlace adhesivo” lo que abarca todo tipo de interacción molecular entre sólidos. La adhesión depende de la fuerza de interacción entre átomos y moléculas, o el grupo funcional de los cuerpos en contacto, lo que a su vez determina su naturaleza.

Las fuerzas de enlaces, son lo suficientemente fuertes como para ocasionar la transferencia de material de una superficie a otra. En los metales el enlace metálico es superior a las fuerzas de Vander Waals, así se obtiene entre los metales puros, enlaces adhesivos de gran fuerza. También las

fuerzas débiles de interacción de Van Der Waals pueden, al aproximarse las moléculas, convertirse en enlaces químicos. En las zonas de los enlaces pueden ocurrir daños en la superficie y sobre ellas pueden surgir gradientes de esfuerzos (positivos o negativos), siendo el gradiente positivo esencial para un proceso normal de fricción y desgaste. Hay diversos factores que varían el signo y magnitud del gradiente, así:

- La formación de un número excesivo de vacancias (gradiente positivo).

- La Formación de dislocaciones genera un fortalecimiento de la superficie de fricción (gradiente negativo).

- Formación de capas protectoras que disminuyan el esfuerzo cortante (gradiente positivo).

- Calentamiento de la zona de contacto y ablandamiento del material (gradiente positivo).⁴

4.2.2.1 Componente molecular de la fricción. Se presenta durante el contacto deslizante de dos materiales blandos relativamente limpios. La unión adhesiva en los microcontactos depende del grado de interpenetración de las irregularidades y de la composición de sus superficies. Si ocurre el deslizamiento, entonces la fuerza de fricción producirá el corte o cizallamiento de los planos tangenciales más débiles de la superficie de contacto real. Suponiendo que la superficie total donde actúa es prácticamente igual al área real de contacto y despreciando la influencia del incremento del área de contacto, puede expresarse que la componente molecular del coeficiente de fricción será:

⁴ Ibid. Pág. 37.

$$fM = \tau_n Ar \quad (1)$$

$$Ar = N/\sigma_t \quad (2)$$

Donde:

τ_n = resistencia al corte

Ar = Area real de contacto

σ_t = Límite de fluencia del material

N = Carga normal

Entonces la componente molecular del coeficiente de fricción será:

$$fM = T/N = \tau_n / \sigma_t \quad (3)$$

El límite de fluencia σ_t es un valor cercano a 5τ . De aquí se deduce que $fM = 0.2$ aproximadamente.⁵

4.2.3 Interacción mecánica. Las altas presiones que se desarrollan en los puntos de contacto individuales conllevan a la extensión de las asperezas o a su penetración, y ello supone cambios irreversibles en la forma de las asperezas en contacto.

La penetración tiene lugar cuando los cuerpos en contacto tienen diferentes valores de dureza y distintos módulos de elasticidad y también cuando teniendo igual dureza en las asperezas en contacto, tiene diferente configuración (radio de curvatura, ángulo de inclinación). Con un incremento posterior de la penetración, aparece la deformación plástica en las asperezas. Si la penetración se incrementa más, la deformación plástica se extiende en todo el contacto y se produce una redistribución de la presión en la misma.

⁵ MARTÍNEZ, P. Francisco. Op cit. Pág. 45.

En el caso de una esfera (simulando una aspereza) penetrando un sólido, se obtiene una distribución de esfuerzos y para una profundidad de penetración dada, se producirá el microcorte; según Kragelski — Druyanov, esto se calcula por la ecuación:

$$\frac{h}{r} \geq 0.5 \left(1 - \frac{2\tau_a}{\sigma_t} \right) \quad (4)$$

donde:

h = profundidad de penetración.

r = radio del vértice de la aspereza.

τ_a = componente molecular de la fuerza de fricción actuante.

σ_t = límite de resistencia del material.⁶

4.2.3.1 Componente mecánico de la fricción. Se origina por la formación de surcos o estrías, al ser penetradas unas irregularidades por otras. La fricción se origina fundamentalmente por las irregularidades de la superficie dura que penetran en el material blando, formando surcos en el mismo por deformación plástica. Según Bowden y Tabor, la carga normal N se compensa por el límite de fluencia del metal en la dirección normal σ_{tN} actuando sobre la superficie real de contacto Ar:

$$N = Ar * \sigma_{tN} \quad (5)$$

La fuerza de fricción T, tangencial al movimiento, será igual al límite de fluencia del metal en la dirección tangencial σ_{tT} , actuando sobre el área de la sección transversal de los surcos, Ag:

$$T = Ag * \sigma_{tT} \quad (6)$$

⁶ MARTÍNEZ, P. Francisco. Op. Cit. Pág. 28.

La componente deformacional del coeficiente de fricción será:

$$F_d = T/N = A_g/A_r \quad (7)$$

Se determina por la relación de áreas A_g/A_r , que depende de la forma de las irregularidades.⁷

4.3 PERFIL ADHESIVO

Por medio de la descripción de las variaciones en las características de los materiales es posible reconocer y mejorar la vida útil o el normal comportamiento operacional de éstos, teniendo en cuenta factores físico — mecánicos como; la velocidad, la carga, las condiciones de las superficies, lubricación y el medio ambiente, con la finalidad de plantear expresiones algebraicas que sirvan como criterio de evaluación o de comparación, de determinado material. Es por ello importante tener en cuenta los siguientes principios:

1. El volumen de material que soporta la carga en el contacto deslizante no es constante y varía de acuerdo a la presión, la rugosidad de las superficies en rozamiento y la presencia de películas en las superficies.
2. El contacto real entre sólidos es discreto y los microvolúmenes del material se deforman, por lo cual la hipótesis de cuerpos homogéneos isotrópicos usada en la mecánica clásica de los cuerpos deformables, es inaplicable.
3. En contraste con cálculos de resistencia, (donde los cuerpos no se fracturan) en los de desgaste es esencial la condición de los procesos de fractura.

⁷ MARTINEZ, P. Francisco. Op. Cit. Pág. 44.

4. Las propiedades de los materiales que toman parte en el deslizamiento, difieren frecuentemente de las de los materiales originales, ya que ellas varían durante el proceso de forma tal que las condiciones de rotura del material también varían.

4.3.1 Desgaste adhesivo. Se presenta cuando un material es removido o desplazado por el efecto producido entre las superficies interactuantes de dos sólidos en contacto, sometidos a una carga y en movimiento relativo, en esencia la interacción entre dos cuerpos sólidos conlleva directamente a la formación de productos de desgaste, luego de generarse una ruptura sobre la base de las asperezas por efecto de la acción constante de las asperezas del cuerpo en contacto, que deben ser mucho más fuertes o duras comparadas con aquellas que fueron desprendidas.

Es posible identificar al menos tres tipos de desgaste, según su mecanismo; elástico, por fatiga y por microcorte, y a su vez éste podría presentarse en dos cuerpos o en tres cuerpos, tal como se muestra en la figura 2.

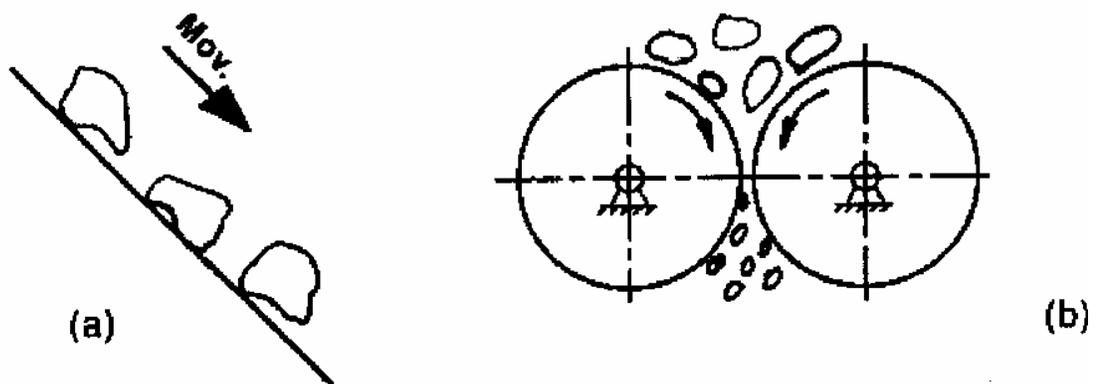


Figura 2. a) Desgaste entre “dos cuerpos”, b) Desgaste entre “tres cuerpos”.

4.4 CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO DE DESGASTE

El desgaste es el proceso en el cual las capas superficiales de un sólido se rompen como resultado de la acción mecánica de otro cuerpo o medio. Si la acción mecánica aparece en forma de fuerza de fricción, entonces al proceso se le llama desgaste por fricción, y el acto de ruptura se localiza en un pequeño volumen del material, el cual es removido de la zona de rozamiento en forma de partículas de desgaste. El proceso de desgaste puede ser descrito gráficamente, para ello se podría establecer una relación de la masa perdida con respecto al tiempo o de la masa perdida con respecto a la distancia deslizada; para cualquiera de las dos relaciones que se establezcan, la proyección gráfica bajo condiciones normales describirá tres etapas, observe la figura 3.

La primera etapa, de asentamiento, es una etapa de no equilibrio del proceso que sigue una función exponencial y representa sólo una pequeña porción del tiempo total de operación del par deslizante. Un régimen específico de desgaste dW/dL , que disminuye con el tiempo durante el deslizamiento. La segunda etapa del proceso, la cual es la más larga, se caracteriza por valores constantes del régimen de desgaste, por lo que sigue una función lineal $dW/dL_f = \text{constante}$. La tercera etapa, de desgaste catastrófico, se caracteriza por un régimen de desgaste e incremento constante y no es aplicable a las superficies en rozamiento.

El desgaste tiene lugar en las partes de la superficie donde hay una fuerte interacción entre los cuerpos en rozamiento, o sea, en los enlaces de las asperezas, que si se suman dan lugar al área real de contacto entre los dos cuerpos. En condiciones estables de desgaste el área real de contacto no varía en ningún momento.

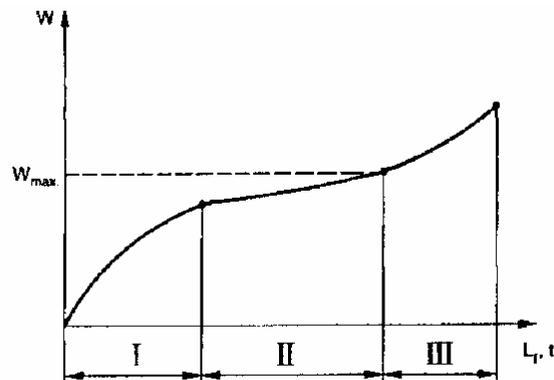


Figura 3. Desgaste W en función del tiempo de operación t : I, asentamiento; II etapa de condiciones estables; III desgaste catastrófico.

Cuando un cuerpo se desplaza relativamente al otro en una cantidad igual al diámetro promedio de los puntos de contacto, los enlaces de fricción existentes se ven perturbados, se forma un nuevo número igual de enlaces y se experimenta un ciclo completo de carga en cualquier punto de la superficie donde existan enlaces de fricción. Se asume que el volumen de material removido de la superficie como partículas de desgaste es proporcional al área real de contacto.

4.5 COEFICIENTE DE FRICCIÓN

La fricción tiene una naturaleza dual, mecánico-molecular, la fuerza de resistencia al movimiento relativo se compone de la resistencia a la deformación de las capas superficiales externas penetradas por las microirregularidades, y de la resistencia debida a las interacciones moleculares en los sectores superficialmente próximos de los cuerpos en contacto.

Por tanto, la fricción viene acompañada de intensa deformación de las capas superficiales del cuerpo menos rígido del par. Sin embargo, no todo

proceso de deformación de las capas superficiales puede considerarse fricción. Se considera fricción a aquellos procesos de deformación de las capas superficiales donde no se destruye la integridad de las mismas, pudiéndose despreciar las deformaciones de las capas inferiores. Por lo tanto, la fricción es posible únicamente cuando la resistencia de las capas superficiales externas es menor que la resistencia de las anteriores. Este principio se denomina Regla del Gradiente Positivo de las propiedades mecánicas en la seno del material.

La deformación de las capas superficiales y las interacciones moleculares de los sólidos en la superficie de separación están relacionadas con la siguiente aproximación. Se puede considerar que la fuerza de fricción es igual a la suma de las resistencias debidas a las acciones intermoleculares, la componente molecular de la fricción y la resistencia debido a la deformación de las capas superficiales penetradas por las microcroyregularidades, donde cada microirregularidad la fuerza de fricción será:

$$F_f = F_m + F_d \quad (8)$$

F_m = componente molecular.

F_d = componente deformacional.

En el área real de contacto A_r actúa un esfuerzo tangencial τ_n , debido a las interacciones moleculares, este esfuerzo tangencial depende del esfuerzo normal P_n en el contacto, según la relación empírica:

$$\tau_n = \tau_o + \beta * P_n \quad (9)$$

τ_0 y β son los coeficientes característicos de la fricción, dependientes de las condiciones de trabajo del par; y se determinan experimentalmente. De acuerdo con la teoría cinética de los líquidos, su viscosidad disminuye con el aumento de la temperatura y aumenta con la presión. Si las condiciones de la fricción no provocan una gran variación de la temperatura, la viscosidad del tercer cuerpo se incrementará con el aumento de los esfuerzos normales en la zona de contacto. En el contacto elástico, el coeficiente de fricción depende fundamentalmente de los factores ambientales y de las propiedades mecánicas de los cuerpos contactantes.

En el contacto plástico no saturado, la componente deformacional del coeficiente de fricción se debe a la resistencia al cambio de la forma (surcado o rayado) de las capas superficiales del elemento más blando del par. Al deslizarse la microirregularidad sobre el contracuerpo deformado plásticamente, en su frente se forma una onda de material deformado, y es posible estimar el coeficiente de fricción con alguna aproximación por medio de la ecuación:

$$f = f_M + 0.5\Delta^{1/2}\left(\frac{P_C}{HB}\right)^{1/4} \quad (10)$$

Donde:

f_M = componente molecular del coeficiente de fricción.

P_C = presión de contorno.

Δ = parámetro que depende de la dureza, la presión de contorno y el módulo de elasticidad reducido.

En el contacto plástico saturado, el coeficiente de fricción se puede estimar por la expresión:

$$f = f_M + 0.9\Delta^{1/2} \left(\frac{P_C}{HB} \right)^{1/2} \quad (11)$$

donde:

$$\Delta = \frac{2.7HB^{5/2}}{P_c^{1/2}(E')^2}$$

HB = Dureza Brinell

E` = módulo de elasticidad reducido.

En el contacto plástico saturado $\frac{\Delta}{HB}$ sufre un incremento, es decir aumenta la presión de contorno. En el presente proyecto se utilizaran las siguientes ecuaciones:

Volumen de material perdido:

$$V = \frac{\text{Peso Inicial} - \text{Peso Final (gr)}}{\text{Densidad (gr/cm}^3)} * 1000 \quad (12)$$

- Velocidad de Desgaste

$$V_{\text{desgaste}} = \frac{\text{Cantidad material desgastado (gr)}}{\text{Tiempo (min)}} \quad (13)$$

Coefficiente de fricción:⁸

$$K = \frac{V * H_M}{P * S} \quad (14)$$

V = volumen de material perdido en mm³.

S = distancia de deslizamiento en mm.

P = carga en kilogramos.

H_M = dureza del material.

K = coeficiente de fricción.

⁸ NORMA ASTM G-8396. Estándar test method for wear testing with a crossed -cylinder apparatus.

4.6 CAMBIOS PRODUCIDOS POR LA FRICCIÓN

La combinación de altas presiones puntuales y de las temperaturas que se generan, unido a la presencia de un medio ambiente activo con respecto a los materiales, conduce a cambios significativos en las propiedades geométricas como físicas y mecánicas de las cajas superficiales de los cuerpos en rozamiento. Estos se pueden dividir en:

1. Cambios en la configuración geométrica de la superficie (geometría del contacto). (Véase figura 4).
2. Cambios en la estructura de la capa superficial que afectan el componente mecánico de la fricción (cambios en la estructura de los sólidos cristalinos).
3. Cambios en las películas que se forman en la superficie y que afectan el componente molecular de la fricción.

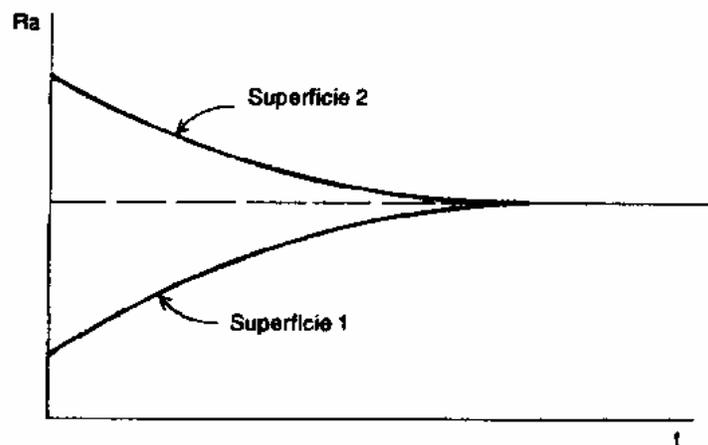


Figura 4. Variación con el tiempo de las rugosidades de las superficies en contacto, alcanzando un valor estable para ambas.

4.6.1 Clasificación de los daños producidos por la fricción. La destrucción de la superficie de rozamiento se manifiesta generalmente por la separación de partículas de material de dimensiones que varían desde pocas fracciones de micras hasta milímetros. La separación se produce por la acción de cargas y pulsos de temperaturas repetidas en las asperezas individuales. Como resultado de la acumulación constante de cambios irreversibles, la no homogeneidad estructural y la aparición de esfuerzos, se generan concentración de tensiones y aparecen grietas que al unirse producen el desprendimiento de partículas.

El desgaste se puede clasificar en tres etapas consecutivas: interacción de las superficies en deslizamiento, cambios en las superficies y destrucción de éstas y se basa en la naturaleza de la interacción entre las superficies y su daño. La naturaleza del proceso incluye la ruptura del enlace friccional, referido a un contacto individual que se forma bajo la acción simultánea de cargas normales y tangenciales y su desaparición cuando la carga normal cesa en su aplicación. Los procesos que tienen lugar en las capas superficiales y los microvolúmenes dependen de factores geométricos, mecánicos, físicos y químicos.

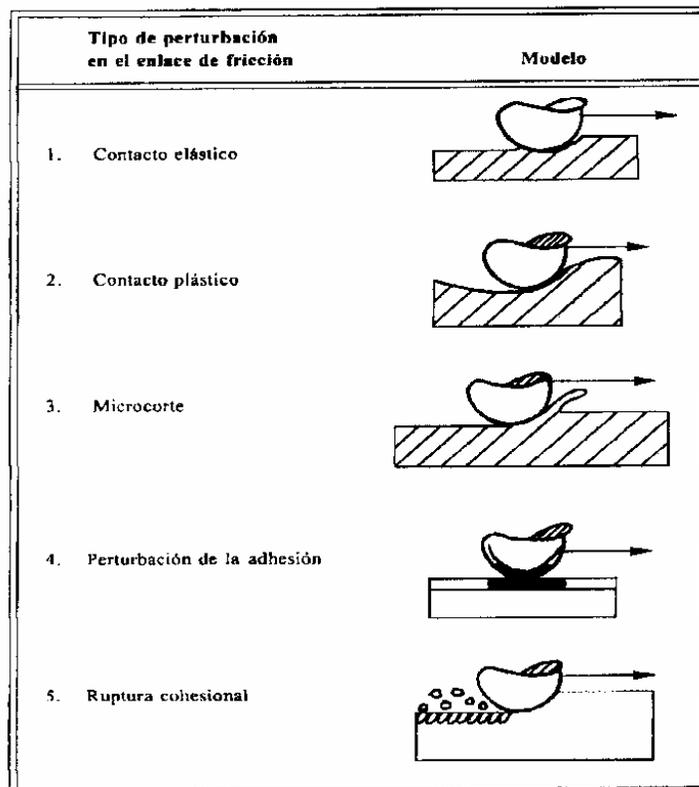
El factor geométrico que caracteriza la relación entre la profundidad de penetración o magnitud de la compresión y el radio de la aspereza (h/r) es uno de los más importantes; brinda la posibilidad de distinguir entre contacto elástico, contacto plástico y microcorte. El factor físico — mecánico que caracteriza la relación entre el esfuerzo tangencial del enlace molecular y el punto de fluencia del material base (τ/σ_t) es un segundo factor importante. Debe distinguirse dos tipos de ruptura del enlace de fricción: la destrucción del enlace a lo largo de la superficie de separación entre los cuerpos o la destrucción del enlace de fricción en el volumen del

material base. Entonces se pueden distinguir cinco tipos de perturbamiento superficial. (Véase figura 5).

1. El desplazamiento elástico del material por las asperezas de la contrafase (contracuerpo) tiene lugar cuando la carga aplicada y la adhesión no conllevan a la aparición de esfuerzos en la zona de contacto que excedan el límite de fluencia del material. En este caso el daño del material (desgaste) sólo puede ocurrir por fatiga por fricción.

2. El desplazamiento plástico o surcado del material tiene lugar cuando el esfuerzo de contacto alcanza o supera el valor del límite de fluencia del material base, pero éste fluye alrededor de la aspereza penetrante de la contrafase (contracuerpo). En este caso el desgaste será resultado de la fatiga de fricción a bajos ciclos.

Figura 5. Tipos de perturbaciones en el enlace de fricción



3. El microcorte tiene lugar cuando los esfuerzos de contacto en la deformación alcanzan valores lo suficientemente grandes como para producir daño (perturbando las condiciones para el flujo del material deformado alrededor de la aspereza penetrante). En este caso, el daño ocurre al mismo tiempo que la interacción. La velocidad, la temperatura y el medio juegan en este caso un papel importante.

4. La perturbación de la adhesión del enlace de fricción (a lo largo de la propia superficie en la cual éste actúa), no conlleva directamente un daño, pero contribuye a los esfuerzos de contacto y a las deformaciones, por ejemplo acompaña a los procesos de fatiga del material.

5. La ruptura de la cohesión surge cuando el enlace de fricción es mayor que la resistencia del material subyacente y provoca rasgaduras profundas. En este caso como en el tres, el desgaste tiene lugar al instante de la interacción, variando el relieve superficial y provocando desprendimiento de partículas de configuración irregular. Bajo condiciones de contacto elástico estos hechos son insignificantes, pero bajo condiciones de contacto plástico pueden apreciarse severas indentaciones.⁹

4.7 ACEROS DE BAJA ALEACIÓN

Constituyen una categoría de materiales ferrosos, que exhiben propiedades mecánicas superiores a las de los aceros al carbono, como resultado de la adición de elementos de aleación tales como el níquel, cromo, molibdeno y otros, el total de elementos de aleación es superior al 2.07% y menor del 10%. En muchos aceros de baja aleación la principal función de los elementos de aleación es incrementar la templabilidad y el endurecimiento,

⁹ KRAGELSKI, I.V. y DOBICHIN, M. N. Friction and wear, calculation methods. London, 1977.

para optimizar las propiedades mecánicas después del tratamiento térmico. Sin embargo, en algunos casos la adición de elementos aleantes busca reducir la degradación que produce el medio en ciertas condiciones de servicios a las cuales son sometidos.

Estos aceros podrían ser clasificados de acuerdo a la composición química: como aceros al Ni, aceros al Ni-Cr, aceros al Cr-Mo, y designación SAE-ALSI, tratamiento térmico como templado y revenido, normalizado y revenido, recocido y Soldabilidad: alta, media y baja.

Abocando a la clasificación por composición química se encuentra los aceros de alta resistencia al cromo — molibdeno; estos contienen entre 0.5 — 9% Cr y entre 0.5 — 1.0% Mo; el contenido de carbono es usualmente inferior a 0.2%; el cromo provee a estos aceros buena resistencia a la oxidación y a la corrosión e incrementa la resistencia a esfuerzos a alta temperatura, estas características son generalmente suministradas durante el normalizado y revenido, o durante el temple y revenido, o durante el recocido. Los aceros al cromo — molibdeno son ampliamente utilizados en la industria de los aceites y el gas, de combustibles fósiles y en plantas de energía nuclear.

4.7.1 Efectos del cromo. Es generalmente adicionado al acero para incrementar la resistencia a la corrosión y a la oxidación, incrementa la templabilidad, mejora la resistencia al esfuerzo a altas temperaturas y mejora la resistencia a la abrasión.

El cromo es un fuerte formador de carburos complejos de cromo y hierro que se forman lentamente en solución en la fase austenítica estable, por lo tanto se necesita un calentamiento lo suficientemente prolongado antes de

realizar el temple. El cromo puede utilizarse para aportar templabilidad y también como elemento endurecedor, al lado del níquel genera mejores propiedades mecánicas. Cabe destacar que se utiliza para incrementar la resistencia a altas temperaturas en conjunto con el molibdeno.

4.7.2 Efectos del molibdeno. El molibdeno mejora las propiedades mecánicas y es un fuerte formador de carburos; mejora la resistencia tensil, la resistencia al calor y la dureza e incrementa la templabilidad. Puede aumentar la resistencia al creep a altas temperaturas de los aceros de baja aleación.¹⁰

4.8 FUNDICIONES BLANCAS ALEADAS AL CROMO

Son nombradas así debido a que su superficie de fractura es característicamente blanca; el carbono insertado está presente en forma de carburos, principalmente del tipo Fe_3C y Cr_7C_3 . Frecuentemente carburos complejos tales como $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ y $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$.

Las fundiciones blancas son usualmente muy duras y esta propiedad es la directamente responsable de su excelente resistencia al desgaste abrasivo. Últimamente hay algunas fundiciones que son referenciadas como fundiciones enfriadas para distinguirlas de las fundiciones que en la totalidad de su sección son blancas.

Las piezas de fundición enfriada, resultan con una superficie virtualmente libre de carbono grafitico, en virtud de que su composición es seleccionada de tal forma, que solo la superficie en contacto directo con el molde será la

¹⁰ GUNDLACH, B. Richard y DOUGLAS, V. Doane. Alloy cast irons. En: metal handbook. Vol. 1. 1996. Pág. 85-86.

que esté libre del carbono grafitico. La fundición blanca está libre de carbono grafitico, por ello su sección es totalmente blanca; esto en virtud de su composición química, parámetro mediante el cual también podría ser controlada su dureza.

Algunas de las características más generales de la fundición blanca consisten en que es de grano grueso, orientado al azar, blanca en su totalidad y relativamente regular en su sección; sumado a ello tiene una composición baja en carbono equivalente y rica en contenido de aleación.

4.8.1 Efectos del cromo en las fundiciones. Los tres usos de mayor importancia son:

- Formación de carburos.
- Aumentar la resistencia a la corrosión.
- Estabilizar la estructura para aplicaciones de alta temperatura.

Cuando el contenido de cromo en las fundiciones es mayor al 10%, se forman carburos eutécticos del tipo M_7C_3 en prelación a los carburos M_3C , que predominan a bajos contenidos de cromo. Sin embargo de forma más significativa, altos contenidos de cromo causan un cambio en el patrón de solidificación hacia una estructura en la cual los carburos de M_7C_3 son rodeados por una matriz de austenita o sus productos de transformación.

Las características de solidificación del hierro hipoeutectico juegan un papel muy importante en la aparición carburos de M_7C_3 mucho más fuertes y duros que los M_3C . La relativa buena resistencia a la abrasión, dureza y resistencia a la corrosión de las fundiciones blancas con alto

cromo, ha llevado al desarrollo de una serie de fundiciones blancas martensíticas o austeníticas, que contienen entre 12-28% de Cr.

Sin embargo debido a que gran parte de este cromo se encuentra combinado, formando carburos; tiene un menor efecto sobre la templabilidad de las fundiciones en relación con la de los aceros. La fundición blanca martensítica usualmente contiene uno o varios de los siguientes elementos Mo, Ni, Mn y Cu, con la finalidad de mejorar la templabilidad; estos elementos promueven la formación de martensita bajo un enfriamiento no tan severo.

El afinamiento (reducción) de la perlita y su endurecimiento es lo que da mayor resistencia a la abrasión, propiedad que es finalmente obtenida durante el enfriamiento en el molde o durante el subsecuente tratamiento térmico. En las fundiciones de alto cromo es difícil mantener bajo el contenido de silicio debido a la presencia de elementos que lo promueven. No obstante resulta ventajoso mantenerlo bajo, porque esa condición mejora la respuesta al recocido y aporta alta dureza cuando la aleación es templada al aire desde altas temperaturas; el alto contenido de silicio no es bueno para este tipo de tratamiento térmico.

4.8.2 Efectos del Molibdeno. El Mo en la fundición blanca está distribuido entre los carburos eutécticos y la matriz, por lo que puede mejorar la profundidad de temple y mejorar la resistencia al desgaste a alta temperatura y a la corrosión. Cuando una fundición blanca martensítica, es destinada para tener una resistencia a la abrasión superior; la adición del Mo debe alcanzar valores entre 0.5 y 3.0% evitando la formación de perlita y otras transformaciones a alta temperatura. El Mo es más efectivo cuando se usa en combinación con el Cu, Cr, Ni o Cr-Ni.

El Mo tiene una ventaja sobre el Mn, Ni o Cu, que consiste en aumentar la profundidad de temple sin generar una considerable sobrestabilidad de la austenita, previniendo la retención indeseable de grandes cantidades de austenita en la estructura final. En las fundiciones de alto cromo, evita la presencia de la perlita, generando alta resistencia a la abrasión, para rangos de concentración entre 1% y 4%.

4.8.3 Efectos del Niobio. El Nb en las fundiciones blancas tiene la tendencia de generar un efecto de refinación del grano, sin embargo este efecto no ha de ser tan marcado.

4.8.4 Efectos del V. El Vanadio es un potente estabilizador de carburos e incrementa la profundidad de temple, dependiendo de la cantidad adicionada y de la composición de la fundición, del tamaño de la sección y de las condiciones de operación.

El alto poder de templabilidad del V en secciones delgadas puede ser balanceada con la adición de Ni, o Cu, o también por medio de un incremento en el C, el Si, o ambos. El vanadio en cantidades entre 0.1 y 0.5 refina el grano. Por esa fuerte tendencia a formar carburos el V es raramente usado en las fundiciones grises o hierro dúctil.¹¹

4.9 ESTADO DEL ARTE

En las últimas décadas, la tribología se ha convertido en una de las ciencias de más rápido desarrollo y para ello, fue crucial la creación de cátedras universitarias en tribología, generando a su vez un mayor

¹¹ STEFANESCU D, M. Efecto de los elementos de aleación, EN: Metal Handbook. Vol. 1, USA 1996. P 144-145.

entendimiento de los fenómenos de fricción y de desgaste, que hacen perder tanta energía y a la vez dinero, en todos los procesos productivos. Los países que más interés han mostrado en este tipo de estudio son:

Gran Bretaña, Estados Unidos, Japón, Alemania, Rusia y en general países desarrollados. Dentro de los procesos tribológicos el que más ha avanzado es aquel de lubricación hidrodinámica y los que menos se han desarrollado son aquellos de modelación de fenómenos de fricción, de lubricación límite y de desgaste, esto debido a la complejidad de la interacción de la superficie de contacto y de la amplia variedad de disciplinas que se deben abocar para su estudio.

Actualmente, se emplean muchos instrumentos y métodos para caracterizar y estudiar las superficies, sin embargo cada uno de ellos tiene dificultades e insuficiencias. Dentro de las tendencias actuales está la de incrementar la resistencia al desgaste en condiciones extremas de trabajo (cargas, temperatura, medio ambiente, altas velocidades).

En nuestra escuela se ha logrado promover cierto interés hacia estudios tribológicos, a través de un grupo de investigación que pretende entender los fenómenos que involucra esta ciencia; y para ello ha elaborado el montaje de una maquina de cilindros cruzados; con el fin determinar coeficientes de fricción y perfiles de desgaste de ciertos materiales; hasta el momento se han evaluado muy pocos materiales, dentro de ellos están, el acero AISI-SAE 1020, latón 60-40, bronce fosforado y fundición gris.

4.9.1 Estado y condiciones del tribómetro de la escuela. La tabla 1 muestra los parámetros de prueba del tribómetro con el cual se realizaron los ensayos. Las velocidades de este tribómetro son un poco superiores a

las expuestas por la norma, sin embargo para equilibrar esto se permite un ajuste en el tiempo de ensayo.

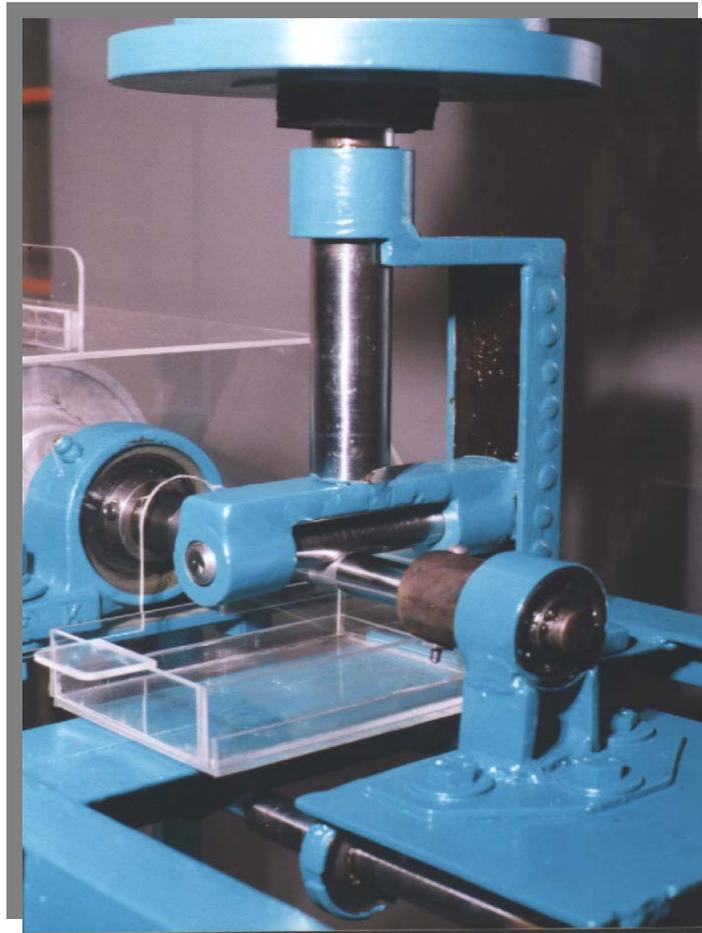
Tabla 1. Parámetros de prueba para el tribómetro utilizado

Procedimiento	Carga (Kgf)	Revoluciones	Velocidad (RPM)	Distancia deslizada (mm)	Tiempo (min)
A	7.119	80.000	442	3191865.6	181
B	7.119	40.000	442	1595932.8	90.5
C	7.119	10.000	110	398983.2	91

Figura 6. Tribómetro de cilindros cruzados (vista total).



Figura 7. Tribómetro de cilindros cruzados (vista parcial).¹²



En las figuras 6 y 7, se muestra la máquina, que consta de un eje de transmisión, que en su extremo está provisto de un sistema de copa y perno, para sujetar la probeta, un dispositivo de brazo, sobre el cual se soporta un eje, junto con el porta probeta y la carga; un sistema de copa móvil y un dispositivo de tornillo sin fin con guía, para el desplazamiento de la misma. El eje de transmisión está soportado por chumaceras en sus extremos y transmite el movimiento del motor por medio de un sistema de poleas y banda.

¹² BÁEZ P., Sandro. Evaluación del desgaste por fricción de algunos metales ferrosos y no ferrosos con una máquina de cilindros cruzados. Bucaramanga, 2002. UIS.

4.10 MÉTODO ESTÁNDAR PARA LA PRUEBA DE DESGASTE CON UNA MÁQUINA DE CILINDROS CRUZADOS (NORMA ASTM G83-96)

Es un método de laboratorio para medir la resistencia al desgaste en materiales metálicos, usando un mecanismo de cilindros cruzados. Durante la prueba se produce un contacto entre un cilindro que rota y un cilindro estático, estos tienen sus ejes longitudinales orientados de forma normal. Cuando los cilindros son del mismo material, los resultados de la prueba de desgaste son reportados como una pérdida de volumen total en milímetros cúbicos del cilindro que rota y del estático; los valores son obtenidos por la adición del volumen perdido entre el que rota y el estático. Los materiales de alta resistencia al desgaste tendrán menor pérdida de volumen.

Para materiales diferentes, los reportes del resultado se dan como la pérdida de volúmenes total en mm^3 del cilindro estático y del que gira, pero también como la pérdida del volumen de cada cilindro por separado. Cuando dos materiales diferentes o aleaciones son ensayados, se recomienda que cada metal o aleación sea ensayado en ambas posiciones. El método de prueba describe tres recomendaciones de procedimiento que son apropiados para diferentes grados de resistencia al desgaste.

Procedimiento A: es un método relativamente severo que clasificará materiales metálicos, que tienen alta resistencia al desgaste. Los materiales con resistencia al desgaste en la categoría de herramientas de acero de alta velocidad son particularmente los programados para esta variante del ensayo.

Procedimiento B: es una variación en pequeños términos del procedimiento A, se disminuye la distancia de deslizamiento.

Procedimiento C: éste es el de más baja velocidad y más pequeña variación de términos respecto al procedimiento A y es particularmente útil en la clasificación de materiales de baja resistencia al desgaste.

La cantidad de desgaste de cualquier sistema en general, depende de un número de factores tenidos en cuenta; tales como la carga aplicada, la velocidad de deslizamiento, la distancia de deslizamiento, medio ambiente como también de las propiedades del material. En este método las condiciones son estandarizadas para proveer un medio de determinación de la velocidad de desgaste relativo a diferentes acoples metálicos. Los resultados del método de prueba, promueven la predicción de la clasificación relativa de varios materiales, donde el contacto metal — metal toma lugar.

El método de prueba no intenta duplicar todas las condiciones que pueden ser experimentadas en servicio, por ejemplo: lubricantes, cargas, partículas removidas por el desgaste y presencia de un medio corrosivo. Por ello no asegura que la prueba predecirá la velocidad de desgaste relativo de un material bajo dichas condiciones.

Tabla 2. Parámetros de prueba según la norma

Procedimiento	Fuerza Aplicada			Revoluciones	Velocidad RPM
	(Newton)	Kg-f	Libras		
A	71.2	7.26	16	80000	400
B	71.2	7.26	16	40000	400
C	71.2	7.26	16	10000	100

Tolerancia de la fuerza aplicada $\pm 3\%$

Tolerancia de la velocidad $\pm 5\%$

5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

5.1 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

Las probetas fueron aportadas por Electromanufacturas Muñoz S.A. en forma superficial totalmente irregular, puesto que fueron elaboradas mediante la aplicación de cordones de soldadura depositados sobre la longitud de un alambión de $\frac{1}{4}$ " x 4 $\frac{1}{2}$ ".

En vista de la irregularidad y relativa alta dureza de las cinco probetas de cada uno de los cuatro grupos evaluados, fue necesario realizar un desbaste inicial con esmeril para buscar una forma cilíndrica de entre 13 y 13.5 mm de diámetro por una longitud de 102 mm de longitud.

Luego se efectuó un montaje en piedra para poder desbastar las probetas a media pulgada y después sobre el centro de la longitud de éstas, realizar un pulido utilizando una piedra de grano más fino.

Tras efectuar el pulido correspondiente a cada probeta llevándolas a lija 600, se logró obtener una rugosidad máxima de $1\mu\text{m}$ que está en los límites permitidos por la norma; un máximo de $1.25\mu\text{m}$. Las probetas se limpiaron con un solvente y secaron en un horno a 150°C antes y después de cada prueba para evitar algún tipo de suciedad o humedad adherida.

Electromanufacturas Muñoz S.A. aportó la composición nominal de las probetas a evaluar.

Tabla 3. Composición nominal de las probetas a evaluar

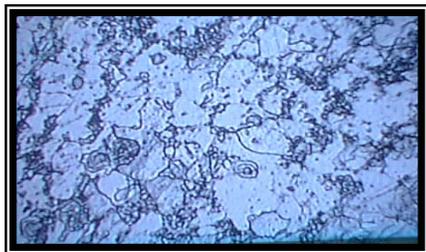
MATERIAL	COMPOSICIÓN NOMINAL
Probetas A ₁ – A ₅ acero de baja aleación	0.2%C, 2%Cr
Probetas B ₁ – B ₅ acero de baja aleación	0.75%C, 8%Cr, 0.5%Mo, 0.5%V
Probetas C ₁ – C ₅ Fundición blanca aleada	4.5%C, 29%Cr, 0.7%Mo, 1.3%V
Probetas D ₁ – D ₅ Fundición blanca aleada	5%C, 23%Cr, 8.5%Mo, 1.3%V, 6%Nb, 6%w

5.2 METALOGRAFIA

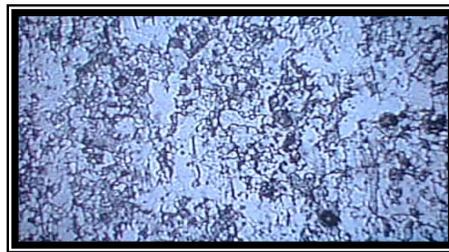
Se realizó un análisis metalográfico de cada uno de los materiales a ensayar, para ello se hizo un corte transversal sobre uno de los extremos de las probetas, luego se llevó a espejo la superficie de corte y se realizó el ataque químico correspondiente; en última instancia se efectuó el análisis en el analizador de imágenes, con el fin de estimar las fases o microestructuras presentes, su respectiva proporción y el tamaño de grano promedio.

A continuación se muestran las micrografías de cada uno de los materiales ensayados:

Figura 8a. Acero de baja aleación “A” al cromo (0.2% C, 2%Cr), atacado químicamente en nital al 2%



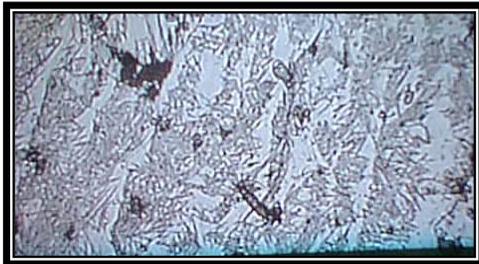
a 500 aumentos



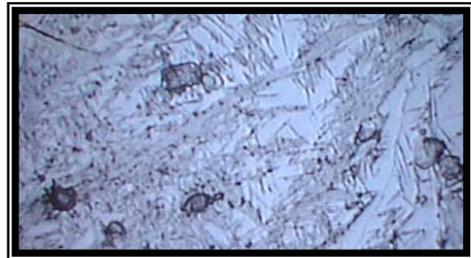
a 250 aumentos

- Fases o microestructuras presentes: Matriz ferrítica y pequeñas cantidades de carburo
- Proporción: 98% ferrita y 2% carburo
- Tamaño de grano promedio: 6 μm

Figura 8b. Acero de baja aleación "B" al cromo (0.75%C, 8%Cr, 0.5%Mo, 0.5%V) atacado químicamente en nital al 2%



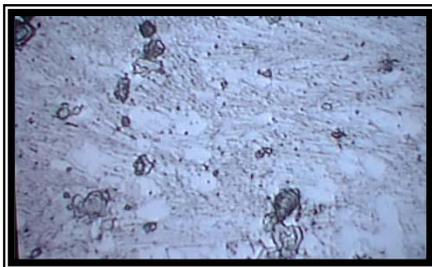
a 250 aumentos



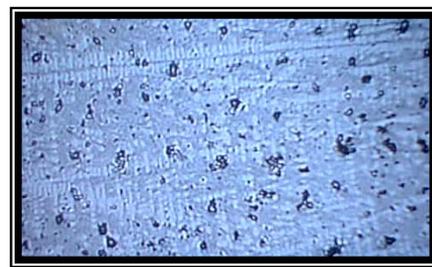
a 500 aumentos

- Fases o microestructuras presentes: Matriz de martensita, una pequeña cantidad de ferrita y carburos.
- Proporción: 15% Carburos, 60% Martensita

Figura 8c. Fundición blanca "C" al cromo (4.5%C, 29%Cr, 0.7%Mo, 1.3%V) atacado químicamente en nital al 2%



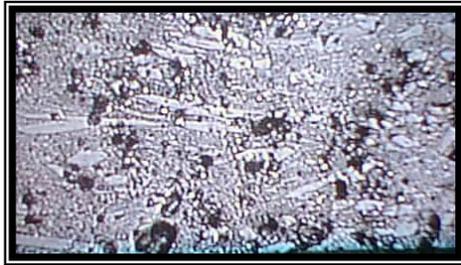
a 500 aumentos



a 125 aumentos

- Fases o microestructuras presentes: Matriz de martensita y carburos
- Proporción: 20% de carburos

Figura 8d. Fundición blanca “D” al cromo (5%C, 23%Cr, 8.5%Mo, 6%Nb, 1.3%V, 6%W) atacado químicamente en nital al 2%



a 125 aumentos



a 500 aumentos

- Fases o microestructuras presentes: Matriz de martensita y carburos
- Proporción: 30% de carburos

5.3 PUESTA A PUNTO DE LA MÁQUINA DE CILINDROS CRUZADOS

La calibración de la máquina se realizó con un acero AISI-SAE 1020, basándose en los parámetros de la Tabla 1.

En el presente trabajo se obtuvo durante la calibración un coeficiente de variación de 10% con referencia a ensayos realizados en este mismo tribómetro. La norma permite un máximo de 15% para ensayos realizados en un mismo laboratorio; con referencia a otros laboratorios es de 14% hasta un máximo de 30%.

5.4 PROCEDIMIENTO PARA EL DESARROLLO DEL ENSAYO DE DESGASTE

- Llevar las probetas a una rugosidad superficial menor a 1.25 μm .
- Limpiar las superficies con un solvente y desprender las impurezas con un elemento de cerdas y secar para eliminar la humedad.

- Pesar cada una de las probetas y establecer su registro.
- Determinar el procedimiento a seguir según corresponda al material (si el material es relativamente duro utilizar A, si el material es relativamente blando utilizar C, si tiene dureza intermedia utilizar B)
- Realizar el desmonte de la carga estática con la palanca.
- Introducir una probeta al portaprobeta estático y ajustar el prisionero.
- Introducir una probeta entre las copas móviles, confrontadas y ajustar los prisioneros con la llave correspondiente.
- Aplicar la carga estática dando un semigiro a la palanca.
- Asegurarse correctamente la posición del recolector de virutas.
- Accionar el interruptor y tener en cuenta el tiempo de ensayo.
- Después de cumplido el tiempo de prueba, detener el accionar de la máquina y realizar el desmonte de la carga con la palanca.
- Retirar ambas probetas luego de aflojar los prisioneros.
- Limpiar el recolector de virutas y cada una de las probetas con un solvente y un elemento de cerdas, evitando la adhesión de limadura sobre la huella.
- Determinar el peso de cada probeta y estimar el valor de pérdida de peso.
- Calcular el volumen del material perdido en mm^3 .

6. RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

En la tabla 4, se observan las propiedades de los materiales utilizados en los ensayos.

Tabla 4. Propiedades de los materiales utilizados.

	MATERIAL	DENSIDAD (gr/cm³)	DUREZA (RC) Calculada	DUREZA (RC) Aportada
A	Acero de baja aleación al Cr.	7.85	27.20 ± 1	28
B	Acero de baja aleación al Cr – V, Mo	7.80	56.0 ± 0.9	60
C	Fundición Blanca con Cr – Mo – V	7.60	54.0 ± 1	55
D	Fundición Blanca Cr – Mo – Nb – V – W	7.60	60.2 ± 0.9	60

En la determinación del coeficiente de fricción se utilizaron las ecuaciones 12, 13 y 14 y los parámetros de la tabla 1.

6.1 PERFILES DE DESGASTE

Después de obtener los resultados de pérdida de peso en las probetas ensayadas, se realizó la proyección gráfica del total de masa perdido entre las probetas fijas y móviles, como función del tiempo, con el fin de obtener el perfil de desgaste adhesivo.

Los perfiles de desgaste se muestran entre las figuras 9 y 12 y la figura 13 compara el comportamiento de todos los materiales.

Figura 9. Perfil de desgaste del acero de baja aleación "A" al cromo, utilizando el procedimiento C descrito en la tabla 1.

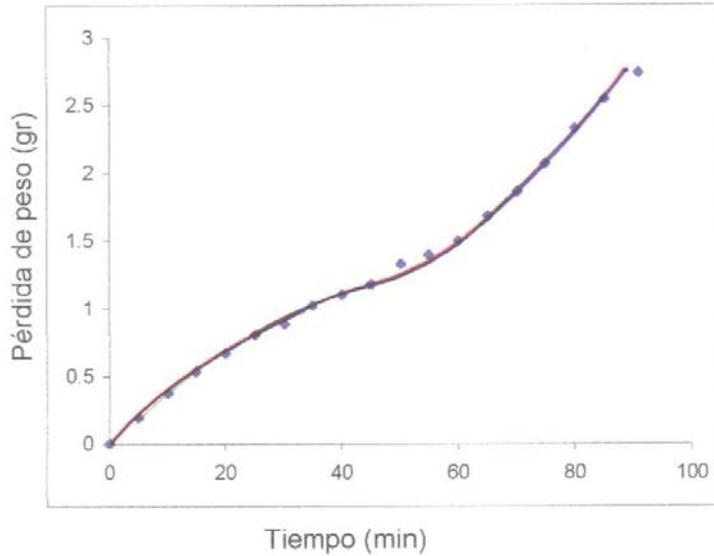


Figura 10. Perfil de desgaste del acero de baja aleación "B" al cromo., utilizando el procedimiento A descrito en la tabla 1.

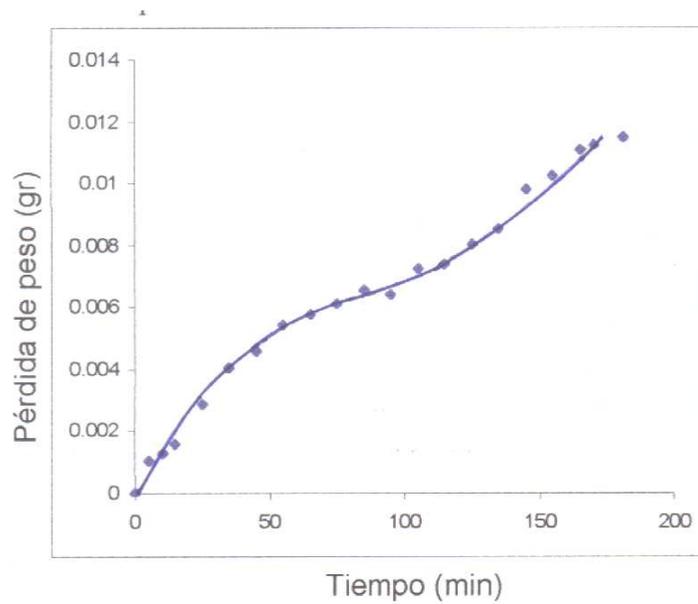


Figura 11. Perfil de desgaste de la fundición blanca "C" al cromo, utilizando el procedimiento A descrito en la tabla 1.

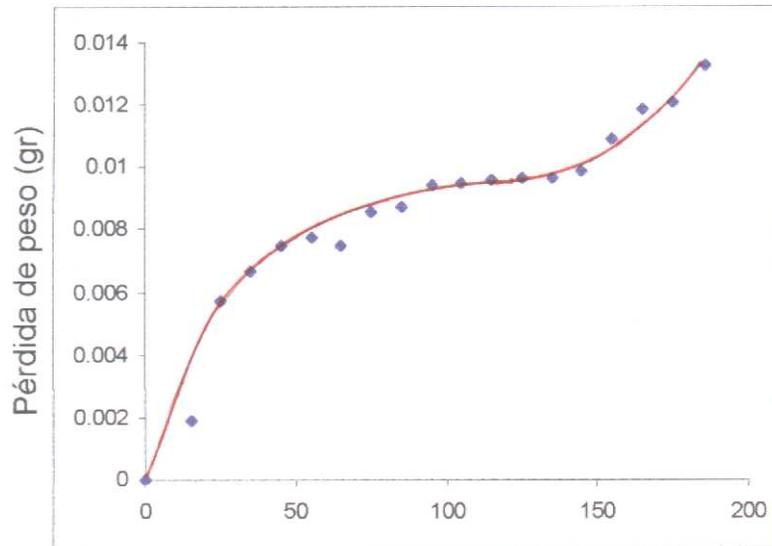


Figura 12. Perfil de desgaste de la fundición blanca "D" al cromo, utilizando el procedimiento A descrito en la tabla 1.

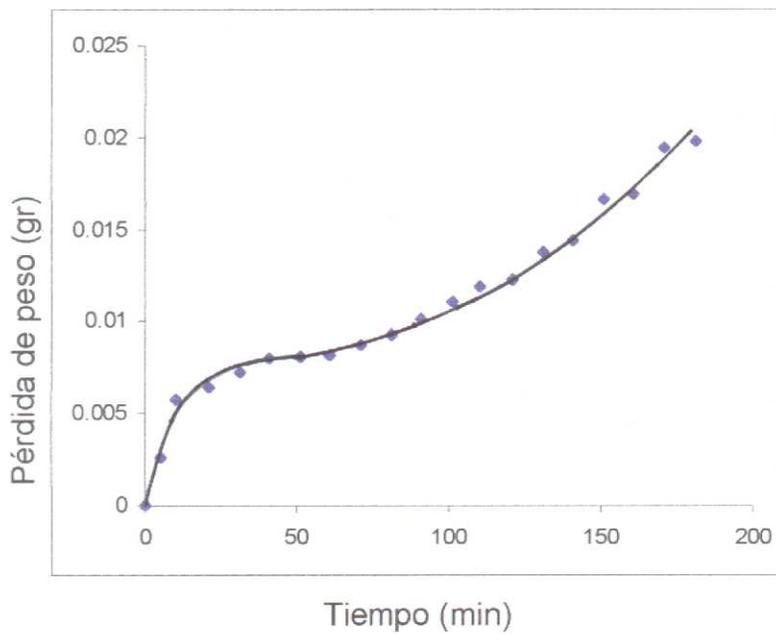
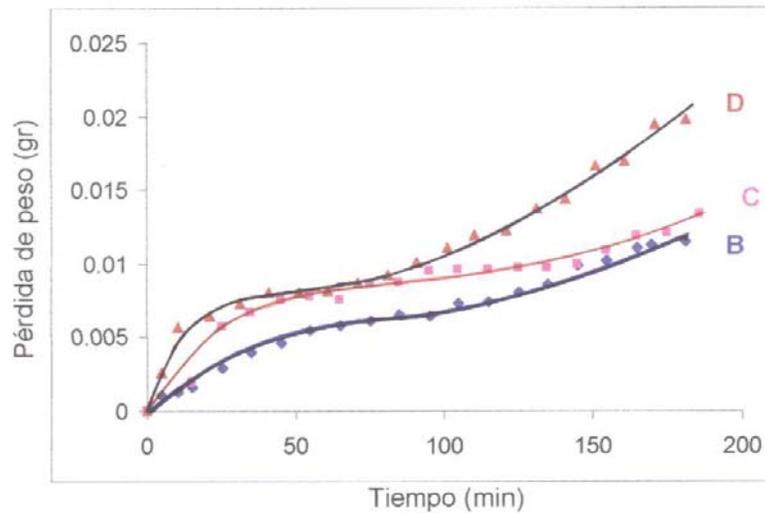


Figura 13. Perfil comparativo de los materiales sometidos a la prueba.



6.2 COEFICIENTES DE FRICCIÓN

La tabla 4 muestra la velocidad de desgaste, el volumen perdido, y el coeficiente de fricción de cada uno de los materiales ensayados, en la máquina de cilindros cruzados. El procedimiento utilizado para los materiales B,C y D bajo sugerencia de la norma fue el A y para el material A se utilizó el procedimiento C. Los procedimientos son descritos en la tabla 1.

Tabla 5. Coeficientes de fricción experimentales

MATERIAL	VOLUMEN PERDIDO (mm³)	VELOCIDAD DE DESGASTE (mm³/min)	K EXPERIMENTAL
Acero de Baja Aleación "A" al Cr	352	3.87	3.4×10^{-3}
Acero de baja aleación "B", con (Cr, Mo y V)	1.41	7.80×10^{-3}	3.5×10^{-6}
Fundición Blanca "C" con (Cr, Mo, V)	1.34	7.40×10^{-3}	3.2×10^{-6}
Fundición Blanca "D" con (Cr, Mo, Nb, V, W)	1.50	8.30×10^{-3}	4.0×10^{-6}

6.3 CONFIABILIDAD DE LOS DATOS

Para ensayos realizados en un mismo laboratorio el coeficiente de variación total, debe tener como límite máximo un 15% para ser considerado aceptable. En este trabajo se obtuvo para el acero A un coeficiente de variación de 5.45%, para el acero B uno de 4.45%, para la fundición C un coeficiente de variación de 5.12% y para la fundición D uno de 10.15%. Si los resultados son confrontados con otros laboratorios se permite como máximo un coeficiente de variación de 30%.

6.4 ANALISIS DE RESULTADOS

Se puede observar en las gráficas de los perfiles de desgaste, tanto para los dos aceros como para las dos fundiciones, que se presentan las tres etapas del proceso de desgaste¹³.

La primera etapa de asentamiento para el acero A se extiende aproximadamente hasta el minuto cuarenta, como se observa en la figura 9; sin embargo, este acero no tiene el límite de esta región muy marcado con relación a la segunda etapa; que podría considerarse muy corta, entre los 40 y 60 minutos. Entre estas dos etapas se produce una pérdida de peso prácticamente constante y relativamente alta. A partir del minuto 60 se logra observar el inicio de la tercera etapa, considerada catastrófica y en la cual se presenta un aumento en la pérdida de peso en forma considerable con respecto a las dos etapas anteriores. La cantidad de cromo que posee este acero (2%) es muy baja para pretender formar los carburos suficientes que aporten la dureza o resistencia al deterioro, y así obtener una buena resistencia al desgaste.

¹³ CZICHOS, H. Tribology –A. Systems Approach to the Lubrication and wear, Elsevier, Amsterdam, 1978. P. 195-196

En la figura 10 se pueden distinguir claramente las tres etapas para el acero B; la etapa de asentamiento se prolongó hasta el minuto 55, la segunda etapa se extiende entre los minutos 55 a 115 y la tercera etapa aparece a partir del minuto 115. Las tres etapas tienen una duración aproximadamente igual.

Este acero contiene elementos de aleación que son fuertes formadores de carburos (Cr – Mo – V) que le confieren una relativa alta dureza, buena resistencia al deterioro, uniformidad, grano fino y buena resistencia al desgaste, cabe destacar que posee una etapa de condiciones estables relativamente corta, comparada con la de las fundiciones blancas C y D.

La figura 11, muestra el perfil de desgaste de la fundición C; la primera etapa se prolongó hasta el minuto 40, la segunda etapa se extiende desde el minuto 40 al 130 y la etapa catastrófica se inicia a partir del minuto 130.

La elevada presencia de cromo aporta gran resistencia a la corrosión y gran formación de carburos, también promovida por la presencia de Mo y V, es así como esta fundición posee una alta dureza, sin embargo la presencia de molibdeno no alcanza a ser lo suficientemente considerable como para prevenir la gran fragilidad de la aleación.

La figura 12, muestra el perfil de desgaste de la fundición D; la etapa de asentamiento se puede observar hasta el minuto 10 ó 20, la segunda etapa se extiende entre los minutos 20 a 120 y la etapa catastrófica se identifica a partir del minuto 120. La elevada presencia de elementos tales como Cr, Mo, V, W le proporciona a la fundición una gran formación de carburos que aportan gran dureza, al igual que la alta presencia de cromo aporta

alta resistencia a la corrosión, sin embargo es notorio el agrietamiento sufrido por esta fundición; No obstante es un material con buen comportamiento ante el desgaste.

La figura 13 permite visualizar con gran facilidad que aproximadamente hasta el minuto 120 los materiales B, C y D tienen una resistencia ante el desgaste adhesivo muy similar y a partir de ese mismo momento la fundición D se desprende un poco del comportamiento de los otros dos materiales.

También es posible observar que las dos fundiciones blancas C y D poseen una segunda etapa, es decir, de condiciones estables con un aumento poco significativo en la pérdida de peso, adicionando a ello una gran duración de éstas, con referencia a las respectivas segundas etapas de los materiales A y B. Este comportamiento permite considerarlos con un tiempo de vida media relativamente largo, bajo condiciones de deslizamiento directo sobre otro cuerpo; mientras que los materiales A y B tienen una muy rápida iniciación de la etapa catastrófica, lo cual permite considerarlos con un tiempo de vida media relativamente corto bajo condiciones de deslizamiento directo sobre otro cuerpo.

7. RECONSTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA DE CILINDROS CRUZADOS

A causa del notable deterioro que a sufrido la máquina de cilindros cruzados como consecuencia del continuo uso que se le ha dado, y tomando en cuenta que este tribómetro corresponde a un prototipo que respondió a la necesidad de implementar herramientas que otorguen a los estudiantes la posibilidad realizar estudios tribológicos; se ha visto la necesidad de realizar mejoras en el equipo en cuanto al diseño.

7.1 CAMBIOS REALIZADOS

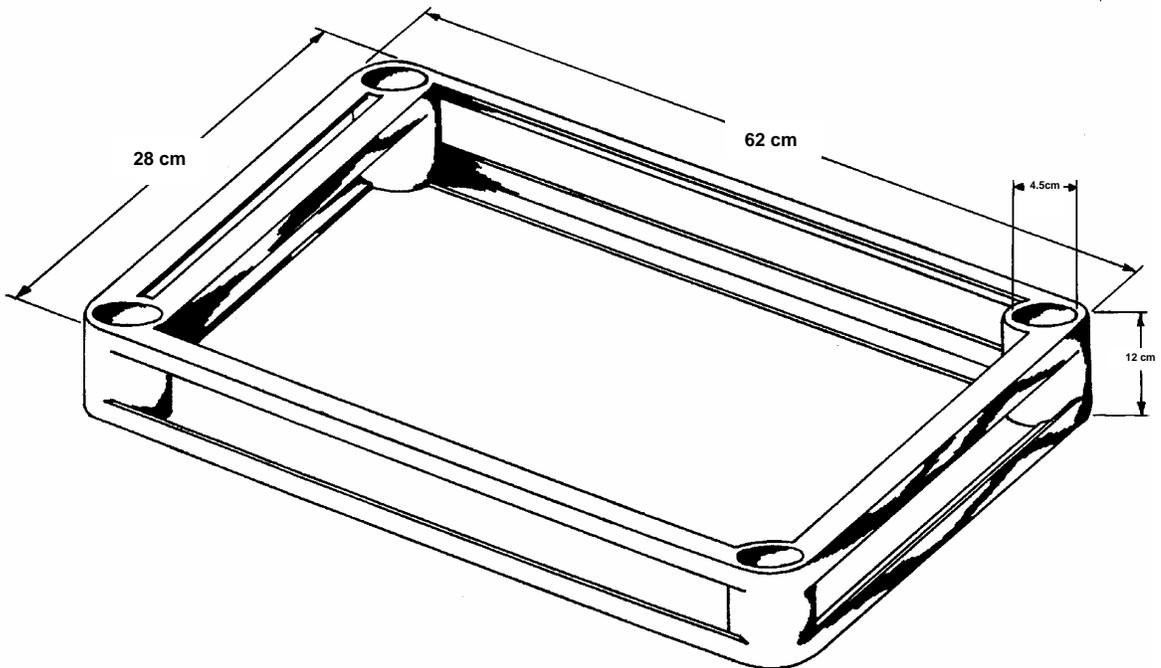
Las modificaciones de mayor importancia incorporadas a la máquina de cilindros cruzados, en busca de mejorar su funcionamiento son:

- Acondicionamiento del portaprobetas estático con doble eje guía, uno de ellos es el de soporte de la carga y el otro se desliza sobre una guía excéntrica adyacente al cuerpo del mismo.
- Acondicionamiento de brazo sostenedor del eje portador del portaprobetas estático ajustado con pernos.
- Acondicionamiento de copas móviles con sus respectivos prisioneros que facilitan el ensayo de materiales muy duros a los cuales ya no sería necesario hacerles orificios transversales sobre los extremos para sujetarlos a las copas.
- Acondicionamiento de una chumacera más fuerte y más funcional, portadora de la copa móvil sin tracción.
- Acondicionamiento de una mesa móvil portadora de la chumacera anteriormente descrita, anexa al tornillo sin fin.

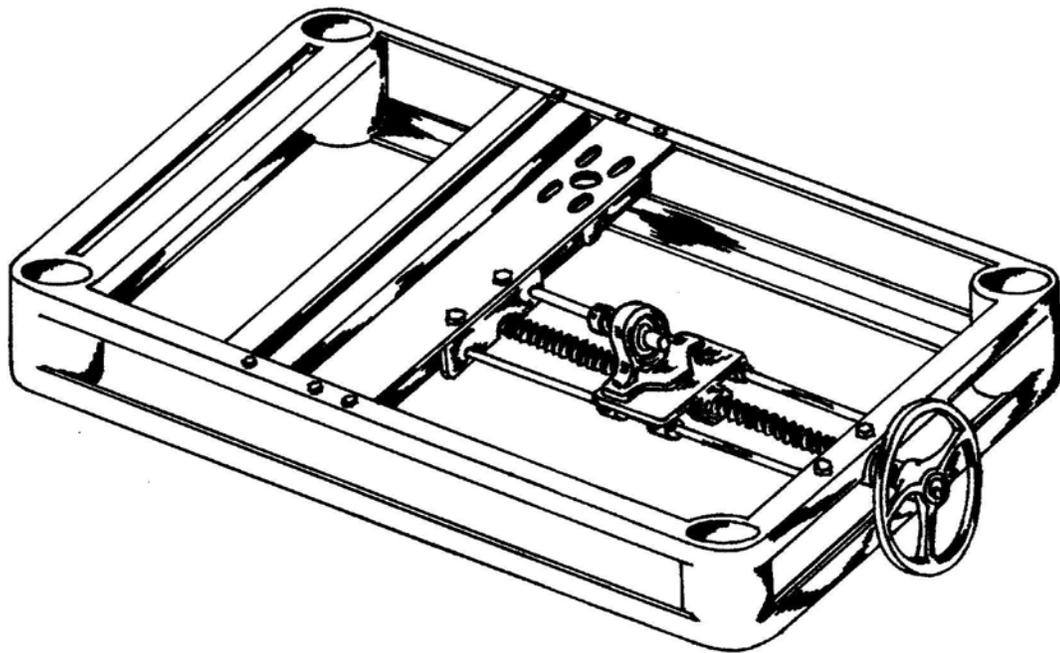
- Incorporación de una mesa portadora de todos los elementos anteriormente descritos, que posee gran fortaleza y que además describe una trayectoria vertical, utilizando como ejes los soportes de la máquina con el fin de evitar el desajuste del motor en los cambios de velocidad.
- Incorporación de pernos en el ajuste de todos los elementos de la mesa, para facilitar la incorporación de nuevos elementos.
- Interruptor eléctrico para el motor.
- Incorporación de una palanca de monte y desmonte de carga.
- Incorporación de un colector de virutas en forma cóncava, para facilitar el desalojo de la viruta.

7.2 PLANO DE LOS CAMBIOS REALIZADOS

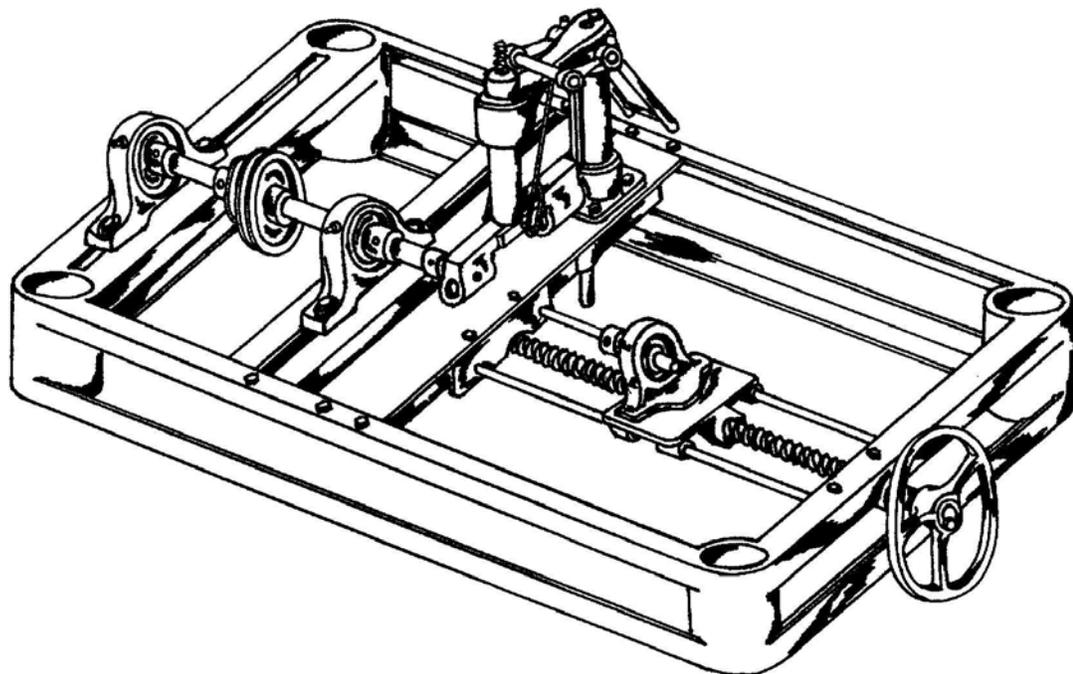
Figura 14. Plano de los cambios realizados



14(a) Plano de la Mesa Portadora de los Elementos de la máquina



14(b) Plano de la Mesa y Chumacera anexa al tornillo sin fin



14(c) Plano Final de los Cambios Realizados a la Máquina de Cilindros Cruzados

7.2.1 Estado de la máquina de cilindros cruzados después de realizar las modificaciones y acondicionamientos.

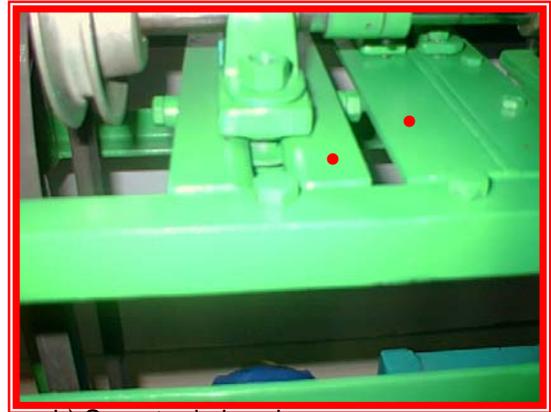
Figura 15. Tribómetro de cilindros cruzados, vista total



Figura 16. Tribómetro de cilindros cruzados, vistas parciales



a) Mesa móvil anexa al tornillo sinfín



b) Soporte de las chumaceras



c) Montador de carga y ejes guía



d) Doble Eje guía



e) Montador de carga



f) Chumacera anexa al tornillo sinfín

Tabla 6. Gastos generados por la reconstrucción de la máquina de cilindros cruzados

a)

GASTOS GENERADOS POR EL FACTOR HUMANO	
CONCEPTO	VALOR
Rectificación de ejes y bujes	50.000
Diseño y Mano de obra de Reconstrucción de la máquina	2.000.000
	2.050.000

b)

GASTOS GENERADOS POR EL FACTOR HUMANO		
CONCEPTO	CANTIDAD	VALOR
6 m de ángulo de 1" x 1/8"	1	30.000
Ejes de 1/2" y 3/4"	2	20.000
1 metro de tubo de 2 1/2"	1	10.000
Tornillería de 1/4" x 1" y 1/2" x 1 1/2"	15	15.000
Prisioneros de 1/4" x 1/2" y 1/4" x 3/4", machos de 1/4" y llaves Bristol	14	20.000
Dinamómetro de 27 Lb	1	15.000
Masilla 250 cm ³	1	5.000
Balineras de 1 1/2"	2	15.000
Anticorrosivo y pintura	1	20.000
Brocas 1/8", 1/4", 1/2" y 17/32"	1	30.000
Interruptor	1	5.000
		185.000

TOTAL	\$2.235.000
--------------	--------------------

8. APORTE DEL PROYECTO

El aporte más importante de este trabajo, consiste en dejar de manifiesto la posibilidad de acceder a la valoración de recubrimientos metálicos en lo concerniente a su comportamiento ante el desgaste adhesivo y del coeficiente de fricción; ampliando con ello el marco de opciones para adelantar este tipo de ensayos, puesto que a nivel local solo se han evaluado materiales metálicos homogéneos en su sección.

CONCLUSIONES

Se determinó el coeficiente de fricción de dos aceros de baja aleación al cromo y de dos fundiciones blancas al cromo, obteniéndose resultados que sirven para decidirse en la selección de alguno de los materiales evaluados; los materiales B y D obtuvieron coeficientes muy parecidos, además de ser los menores, el acero A obtuvo el mayor coeficiente.

Se elaboró para cada uno de los materiales, el respectivo perfil de desgaste, a partir del cual se pudo concluir que los materiales B, C y D tienen una resistencia ante el desgaste muy similar; sin embargo el acero B es el menos susceptible al agrietamiento, el material con menor resistencia ante el desgaste fue el acero A.

Se logró mejorar la operabilidad de la máquina de cilindros cruzados y mejorar su funcionamiento gracias a la reconstrucción de algunas piezas ya existentes y el acondicionamiento de otras al sistema.

Se logró ampliar las posibilidades de estudio de los materiales, ahora considerando la posibilidad de ensayar tan bien en la máquina de cilindros cruzados, materiales metálicos tratados con recubrimientos duros por soldadura.

El tiempo de vida media de las fundiciones C y D es relativamente alto, bajo condiciones de deslizamiento directo sobre otros cuerpos en comparación con los aceros A y B; obviamente la presencia de elementos aleantes formadores de carburos contenidos en las fundiciones, sumado a su alta proporción, le aportan a estos materiales la dureza y resistencia de

deterioro suficiente para tener una etapa de condiciones estables lo suficientemente prolongada, que le permitan tener un tiempo de vida media relativamente alto.

RECOMENDACIONES

Aunque los materiales B, C y D, poseen una resistencia ante el desgaste muy similar, la mejor alternativa la constituye el acero B, ya que la fundición C es muy frágil y junto a la fundición D, muestran un agrietamiento significativo que los podría conducir a fallar.

Los materiales tratados con recubrimientos duros por soldadura, previo a caracterizarlos, se deben desbastar en esmeril, lógicamente evitando un calentamiento por encima de los 200°C; antes de recurrir a su desbaste en torno y posterior rectificación.

Seguir acondicionando elementos a la máquina que permitan mejorar su funcionamiento y su precisión, por ejemplo: realizar el montaje de un motor con regulador de velocidad eléctrico, con el fin de evitar la utilización de las poleas, incorporar un temporizador electrónico automático o acondicionar un sistema de aplicación de carga hidráulico o neumático con su respectivo dispositivo regulador.

BIBLIOGRAFIA

ASM HANDBOOK. Vol. 1. Properties and selection: irons, steels, and high performance alloys. 1995.

AVNER H., Sydney. Introducción a la metalurgia física. México, 1981. Mc Graw Hill.

BÁEZ PIMIENTO, Sandro. Evaluación del desgaste por fricción de algunos metales ferrosos y no ferrosos, con una máquina de cilindros cruzados. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2002.

CRAGELSK1, I.V. Friction and Wear, London, 1965.

CZICHOS, H. Tribology –A. Systems Approach to the Lubrication and wear, Elsevier, Amsterdam, 1978. P. 195-196

FRICITION AND WEAR TESTING. Source Book: Selected References from. 1987.

ASTM Standards and ASM Handbooks HALLING, J. Principles of Tribology, The Macmillan Press, 1975.

MARTINEZ PEREZ, Francisco. La Tribología, Ciencia y Técnica para el Mantenimiento, Limusa, México, 1997.

MILLER L, Engineering Dimensional Metrology, 1962

NORMA ASTM G83-96 Método estándar para un ensayo de desgaste con un aparato de cilindros cruzados.

NORMA ASTM G40. Terminología estándar relacionada con el desgaste y la erosión.

P. BEER, Ferdinand y E. RUSSELL, Johnston Jr. Mecánica de material. Editorial Mc Graw Hill. 1998.

SARCAR, A.D. Desgaste de Metales, Limusa, México, 1990.

VALENCIA, Asdrubal. Tecnología del Tratamiento Térmico de los Metales, Editorial Universidad de Antioquia Colombia, 1992.

VITE TORRES, M. Et al. Necesidades de la enseñanza de la tribología en los programas de ingeniería de las universidades públicas mexicanas. México, 1994.

Anexos

Anexo A. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS COMO LO EXIGE LA NORMA ASTM G-8396

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS			
TIPO DE MOVIMIENTO	DESLIZAMIENTO SIMPLE			
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN			
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO DE BAJA ALEACIÓN "A" AL CROMO			
CARGA	7.119 Kg			
VELOCIDAD	110			
TIEMPO	91			
PRUEBA N°	PROBETA ESTÁTICA		PROBETA EN MOVIMIENTO	MASA TOTAL PERDIDA gr
	MASA PERDIDA gr	DIAMETRO DE LA HUELLA mm	MASA PERDIDA gr	
1	1.58848	9.4	1.37924	2.96772
2	1.27909	9.4	1.46026	2.73935
3	1.19405	9.4	1.46430	2.65835
4	1.20594	9.4	1.46608	2.67202
	$\bar{x} = 1.31689$		$\bar{x} = 1.44247$	$\bar{x} = 2.75936$
	R = 0.39443		R = 0.08506	R = 0.30937
	1/d ₂ = 0.48570		1/d ₂ = 0.48570	1/d ₂ = 0.48570
	s = 0.19157		s = 0.04131	s = 0.15026
	v = 14.55%		v = 2.86%	v = 5.45%

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS			
TIPO DE MOVIMIENTO	DESLIZAMIENTO SIMPLE			
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN			
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	ACERO DE BAJA ALEACIÓN "B" AL CROMO CON Mo y V.			
CARGA	7.119 Kg			
VELOCIDAD	442			
TIEMPO	181			
PRUEBA N°	PROBETA ESTÁTICA		PROBETA EN MOVIMIENTO	MASA TOTAL PERDIDA gr
	MASA PERDIDA gr	DIAMETRO DE LA HUELLA mm	MASA PERDIDA gr	
1	0.00505	3.2	0.00645	0.01150
2	0.00588	3.2	0.00478	0.01066
3	0.00728	3.2	0.00416	0.01144
4	0.00635	3.2	0.00413	0.01048
	$\bar{x} = 0.00614$		$\bar{x} = 0.00488$	$\bar{x} = 0.01102$
	R = 0.00223		R = 0.00232	R = 0.00102
	1/d ₂ = 0.48570		1/d ₂ = 0.48570	1/d ₂ = 0.48570
	s = 0.00108		s = 0.00011	s = 0.00049
	v = 17.59%		v = 2.25%	v = 4.45%

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS			
TIPO DE MOVIMIENTO	DESLIZAMIENTO SIMPLE			
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN			
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	FUNDICIÓN BLANCA "C" CON Cr – Mo – V			
CARGA	7.119 Kg			
VELOCIDAD	442			
TIEMPO	181			
PRUEBA N°	PROBETA ESTÁTICA		PROBETA EN MOVIMIENTO	MASA TOTAL PERDIDA gr
	MASA PERDIDA gr	DIAMETRO DE LA HUELLA mm	MASA PERDIDA gr	
1	0.00461	3.1	0.00865	0.01326
2	0.00490	3.1	0.00465	0.00885
3	0.00618	3.1	0.00217	0.00835
4		3.1		
	$\bar{x} = 0.00554$		$\bar{x} = 0.00341$	$\bar{x} = 0.00860$
	R = 0.00128		R = 0.00248	R = 0.00050
	1/d ₂ = 0.88650		1/d ₂ = 0.88650	1/d ₂ = 0.88650
	s = 0.00113		s = 0.00220	s = 0.0044
	v = 20.40%		v = 64.52%	v = 5.12%

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS			
TIPO DE MOVIMIENTO	DESLIZAMIENTO SIMPLE			
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN			
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	FUNDICIÓN BLANCA "D" CON Cr – Mo – Nb – V – W			
CARGA	7.119 Kg			
VELOCIDAD	442			
TIEMPO	181			
PRUEBA N°	PROBETA ESTÁTICA		PROBETA EN MOVIMIENTO	MASA TOTAL PERDIDA gr
	MASA PERDIDA gr	DIAMETRO DE LA HUELLA mm	MASA PERDIDA gr	
1	0.00477	2.9	0.01498	0.01975
2	0.00652	2.9	0.00617	0.01269
3	0.00415	2.9	0.00672	0.01087
4	0.00532	2.9	0.00541	0.01073
	$\bar{x} = 0.00533$		$\bar{x} = 0.00610$	$\bar{x} = 0.01143$
	R = 0.00237		R = 0.00131	R = 0.00196
	1/d ₂ = 0.5907		1/d ₂ = 0.5907	1/d ₂ = 0.5907
	s = 0.00140		s = 0.00077	s = 0.00116
	v = 26.27%		v = 12.62%	v = 10.15%

**Anexo B. REPORTE DE DATOS DE PERDIDA DE PESO SUFRIDA DURANTE
LOS ENSAYOS**

**PROCEDIMIENTO C
APLICADO A LAS PROBETAS "A"**

Time	Prob (A₁) Estática	Prob (A₂) Girart	Total	Peso Perdido
0	94.71725	92.26291	186.98016	0.0000
7	94.62963	92.14068	186.77031	0.20985
10	94.61284	92.1151	186.72794	0.25222
15	94.577	92.05661	186.63361	0.34655
20	94.52187	91.97237	186.49424	0.48592
25	94.4537	91.87754	186.33124	0.64892
30	94.3854	91.77985	186.16525	0.81491
35	94.32393	91.70277	186.0267	0.95346
40	94.26679	91.61608	185.88287	1.09729
45				
50	93.62495	91.54448	185.16943	1.81073
55				
60	93.48544	91.37089	184.85633	2.12383
65				
70	93.37978	91.23235	184.61213	2.36803
75				
80	93.2728	91.08595	184.35875	2.62141
85				
91	93.12877	90.88367	184.01244	2.96772

**PROCEDIMIENTO C
APLICADO A LAS PROBETAS "A" (Graficado)**

Time	Prob (A ₁) Estática	Prob (A ₄) Girart	Total	Peso Perdido
0	94.26600	95.57414	189.84014	0.0000
5	94.19423	95.44934	189.64357	0.19657
10	94.12719	95.33246	189.45959	0.38055
15	94.07113	95.23580	189.30693	0.53321
20	94.01843	95.15612	189.17455	0.66559
25	93.95895	95.07434	189.03329	0.80685
30	93.9258	95.02590	188.95170	0.88844
35	93.87432	94.94350	188.81782	1.02232
40	93.84400	94.88941	188.73341	1.10673
45	93.81415	94.84333	188.65748	1.18266
50	93.75800	94.75786	188.51586	1.32428
55	93.72832	94.70950	188.43782	1.40232
60	93.68790	94.65304	188.34094	1.49920
65	93.58630	94.57134	188.15764	1.68250
70	93.48414	94.49056	187.97470	1.86244
75	93.36316	94.40909	187.77225	2.06789
80	93.21793	94.29460	187.51253	2.32761
85	93.08772	94.20397	187.29169	2.54845
91	92.98691	94.11388	187.10079	2.73935

**PROCEDIMIENTO C
APLICADO A LAS PROBETAS "A"**

Time	Prob (A ₃) Estática	Prob (A ₅) Girart	Total	Peso Perdido
0	96.89497	97.14433	194.0393	0.0000
91	95.70092	95.68003	191.38095	2.65835
Time	Prob (A ₃) Estática	Prob (A ₅) Girart	Total	Peso Perdido
0	95.70092	95.68003	191.38095	0.0000
91	94.49498	94.21395	188.70893	2.67202

**PROCEDIMIENTO A
APLICADO A LAS PROBETAS "B" (Graficado)**

Time	Prob (B₁) Estática	Prob (B₂) Girart	Total	Peso Perdido
0	96.03100	94.12533	190.15633	0.00000
5	96.03098	94.12431	190.15529	0.00104
10	96.03088	94.12415	190.15503	0.00130
15	96.03074	94.12400	190.15474	0.00159
20				
25	96.03001	94.12345	190.15346	0.00287
30				
35	96.02953	94.12278	190.15231	0.00402
40				
45	96.02918	94.12258	190.15176	0.00457
50				
55	96.02890	94.12200	190.1509	0.00543
60				
65	96.02868	94.12190	190.15058	0.00575
70				
75	96.02846	94.12178	190.15024	0.00609
80				
85	96.02838	94.12139	190.14977	0.00656
90				
95	96.02180	94.12119	190.14937	0.00696
100				
105	96.02803	94.12104	190.14907	0.00726
110				
115	96.02793	94.12100	190.14893	0.00740
120				
125	96.02752	94.12077	190.14829	0.00804
130				
135	96.02728	94.12051	190.14779	0.00854
140				
145	96.02661	94.11989	190.1465	0.00983
150				
155	96.02640	94.11970	190.1461	0.01023
160				
165	96.02632	94.11894	190.14526	0.01107
170	96.02619	94.11892	190.14511	0.01122
175				
181	96.02595	94.11888	190.14483	0.01150

**PROCEDIMIENTO A
APLICADO A LAS PROBETAS "B"**

Time	Prob (B₁) Estática	Prob (B₃) Girart	Total	Peso Perdido
0	96.02650	96.16652	192.19302	0.00000
5				
10	96.02605	96.16600	192.19205	0.00097
15				
20	96.02546	96.16505	192.19051	0.00251
25				
30	96.02510	96.16483	192.18993	0.00309
35				
41	96.02486	96.16448	192.18934	0.00368
46				
51	96.02435	96.16442	192.18877	0.00425
56				
61	96.02404	96.46409	192.18813	0.00489
66				
71	96.02374	96.46351	192.18725	0.00577
76				
81	96.02366	96.16322	192.18688	0.00614
86				
91	96.02337	96.31600	192.18653	0.00649
96				
101	96.02303	96.16310	192.18613	0.00689
106				
111	96.02269	96.16302	192.18571	0.00731
116				
121	96.02217	96.16290	192.18507	0.00795
126				
131	96.02200	96.16269	192.18469	0.00833
136				
141	96.02190	96.16233	192.18423	0.00879
146				
151	96.02137	96.16221	192.18358	0.00944
156				
161	96.02114	96.16203	192.18317	0.00985
166				
171	96.02100	96.16195	192.18295	0.01007
176				
181	96.02062	96.16174	192.18236	0.01066

**PROCEDIMIENTO A
APLICADO A LAS PROBETAS "B"**

Time	Prob (B₁) Estática	Prob (B₄) Girart	Total	Peso Perdido
0	96.02017	96.14444	192.16461	0.00000
181	96.01289	96.14028	192.15317	0.01144
Time	Prob (B₁) Estática	Prob (B₅) Girart	Total	Peso Perdido
0	96.01289	96.13143	192.14432	0.00000
181	96.00654	96.1273	192.13384	0.01048

**PROCEDIMIENTO A
APLICADO A LAS PROBETAS "C"**

Time	Prob (C₁) Estática	Prob (C₃) Girart	Total	Peso Perdido
0	94.22490	93.50125	187.72615	0.00000
10				
15	94.22395	93.50032	187.72427	0.00188
20				
25	94.22373	93.49670	187.72043	0.00572
30				
35	94.22342	93.49607	187.71949	0.00666
40				
45	94.22300	93.49564	187.71864	0.00751
50				
55	94.22290	93.49548	187.71838	0.00777
60				
65	94.22278	93.49539	187.71817	0.00798
70				
75	94.22263	93.49497	187.71760	0.00855
80				
85	94.22257	93.49485	187.71742	0.00873
90				
95	94.22220	93.49452	187.71672	0.00943
100				
105	94.22215	93.49450	187.71665	0.00950
110				
115	94.22211	93.49446	187.71657	0.00958
120				
125	94.22210	93.49443	187.71653	0.00962
130				
135	94.22208	93.49441	187.71649	0.00966
140				
145	94.22200	93.49432	187.71632	0.00983
150				
155	94.22173	93.49357	187.71530	0.01085
160				
165	94.22095	93.49335	187.71430	0.01185
170				
175	94.22075	93.49335	187.71410	0.01205
180				
186	94.22029	93.49260	187.71289	0.01326

**PROCEDIMIENTO A
APLICADO A LAS PROBETAS "C"**

Time	Prob (C₁) Estática	Prob (C₃) Girart	Total	Peso Perdido
0	94.2145	93.4937	187.7075	0
181	94.2096	93.48905	187.69865	0.00885
Time	Prob (C₁) Estática	Prob (C₄) Girart	Total	Peso Perdido
0	94.22068	93.2854	187.50608	0
181	94.2145	93.28323	187.49773	0.00835

**PROCEDIMIENTO A
APLICADO A LAS PROBETAS "D"**

Time	Prob (D₂) Estática	Prob (D₃) Girart	Total	Peso Perdido
0	95.03119	94.56977	189.60096	0.00000
5	95.03667	94.56771	189.59838	0.00258
10	95.02940	94.56583	189.59523	0.00573
15				
21	95.02885	94.56572	189.59457	0.00639
26				
31	95.02883	94.56485	189.59368	0.00728
36				
41	95.02882	94.56411	189.59293	0.00803
46				
51	95.02881	94.56405	189.59286	0.00810
56				
61	95.02880	94.56400	189.5928	0.00816
66				
71	95.02871	94.56356	189.59227	0.00869
76				
81	95.02869	94.56300	189.59169	0.00927
86				
91	95.02867	94.56220	189.59087	0.01009
96				
101	95.02860	94.56133	189.58993	0.01103
106				
110	95.02857	94.56053	189.5891	0.01186
116				
121	95.02852	94.56017	189.58869	0.01227
126				
131	95.02806	94.55917	189.58723	0.01373
136				
141	95.02785	94.55871	189.58656	0.01440
146				
151	95.02774	94.55661	189.58435	0.01661
156				
161	95.02762	94.55639	189.58401	0.01695
166				
171	95.02651	94.55505	189.58156	0.01940
176				
181	95.02642	94.55479	189.58121	0.01975

**PROCEDIMIENTO A
APLICADO A LAS PROBETAS “D”**

Time	Prob (D₂) Estática	Prob (D₁) Girart	Total	Peso Perdido
0	95.02198	97.34542	192.3674	0
181	95.01546	97.33925	192.35471	0.01269
Time	Prob (D₂) Estática	Prob (D₄) Girart	Total	Peso Perdido
0	95.01546	96.33978	191.35524	0
181	95.01131	96.33306	191.34437	0.01087
Time	Prob (D₂) Estática	Prob (D₅) Girart	Total	Peso Perdido
0	95.0263	96.1655	191.1918	0
181	95.02098	96.16009	191.18107	0.01073

ANEXO C. REPORTE DEL MANEJO ESTADÍSTICO UTILIZADO EN LA DETERMINACIÓN DE DUREZAS Y DENSIDADES

La incertidumbre dada a la variabilidad de los datos, todos los valores de dureza calculados pertenecen a la escala de dureza RC.

ACERO "A"	
Valores obtenidos con el probador de durezas CLARK	
Valores Di →	25, 22, 24, 27, 27, 27, 25, 27, 26, 26, 24, 23, 27, 27, 22, 24, 25, 25, 26, 27, 27, 24, 23, 24.
Media \overline{DP} →	≈27.2
Incertidumbre IV →	$\frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (D_i - \overline{DP})^2} = \frac{1}{\sqrt{24}} \sqrt{\frac{1}{23} (68)} \approx 0.4$

ACERO "B"	
Valores Di →	
	54, 52, 56, 56, 55, 55, 56, 54, 54, 54, 55, 54, 52, 53, 53, 53, 54, 53, 54, 53, 54, 54, 54
Media \overline{DP} →	≈56.0
Incertidumbre IV →	$\frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (D_i - \overline{DP})^2} = \frac{1}{\sqrt{23}} \sqrt{\frac{1}{22} (32)} \approx 0.3$

FUNDICION "C"	
Valores Di →	
	52, 50, 52, 53, 54, 55, 50, 54, 53, 51, 54, 51, 50, 54, 52, 50, 52, 54, 51, 52, 52, 50, 52, 50
Media \overline{DP} →	≈54.0
Incertidumbre IV →	$\frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (D_i - \overline{DP})^2} = \frac{1}{\sqrt{24}} \sqrt{\frac{1}{23} (47)} \approx 0.3$

FUNDICION “D”	
Valores Di →	58, 56, 57, 58, 59, 60, 59, 62, 60, 58, 57, 55, 57, 58, 59, 58, 56, 59, 62, 61, 59, 58, 57, 54
Media \overline{DP} →	≈60.2
Incertidumbre IV →	$\frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (D_i - \overline{DP})^2} = \frac{1}{\sqrt{24}} \sqrt{\frac{1}{23} (90)} \approx 0.4$

NOTA: no se tienen datos de la última certificación de calibración del durómetro ni de la última certificación de calibración de la balanza utilizada.