

**“EVALUACIÓN DEL DESGASTE ADHESIVO DE LATONES EN UNA  
MÁQUINA DE CILINDROS CRUZADOS”**

**FRANZ JYHOVANNY LUNA GAMBOA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2005**

**“EVALUACIÓN DEL DESGASTE ADHESIVO DE LATONES EN UNA  
MÁQUINA DE CILINDROS CRUZADOS”**

**FRANZ JYHOVANNY LUNA GAMBOA**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Metalúrgico**

**DIRECTOR**

**Ph.D DARÍO YESID PEÑA BALLESTEROS**

**CODIRECTOR**

**ING SANDRO BÁEZ PIMIENTO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2005**

Esta nueva meta la dedico a mis padres por su paciencia, apoyo y ejemplo de vida, a mis hermanos Carlos, Julios y Nelcy, a mis queridas primitas Nasy, Osmany y Mayerly que en su momento supieron alentarme para seguir adelante en mis momentos de flaqueza y en general a toda mi familia y amigos, pero muy en especial a mi querida Zaida por su amor y porque ha sabido llenarme de alegría con la bienaventuranza del fruto de nuestro imperecedero amor, nuestra preciosa Sarita...

**Franz Jyhovanny**

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor expresa sus agradecimientos a:

A él creador todo poderoso, que guía mi camino y me brinda su sabiduría y su fortaleza en los momentos más difíciles de mi vida.

A mi FAMILIA por sus enseñanzas, su apoyo, su paciencia y sobretodo por su fe en mí

A la ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES, junto con todos sus miembros, por su colaboración en la consecución de este trabajo.

A la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, y a toda la gran familia que la conforma, por aceptarme como uno de ellos y por brindarme la oportunidad de formarme como persona y como un profesional integral.

Al Ph. D. DARIO YESID PEÑA y al Ing SANDRO BÁEZ PIMIENTO por haberme dado la oportunidad de realizar este trabajo, bajo su amparo.

A los técnicos AMBROSIO, MARIO, DANIEL, JAVIER, FERMIN y WILSON por su incondicional colaboración, su experiencia, sus enseñanzas y su oportuna atención.

Y a todas aquellas personas que me acompañaron en el camino y que de una u otra forma me dieron su apoyo y su amistad, pero muy en especial a esa persona maravillosa que me entrego su amor, el cual ya dio frutos, Zaida y Daiana.

## CONTENIDO

	pág
INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS	17
1.1 OBJETIVO GENERAL	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2. JUSTIFICACIÓN	18
3. ALCANCES DEL PROYECTO	19
4. MARCO TEÓRICO	20
4.1 LATÓN	20
4.2 PROPIEDADES DEL LATÓN	22
4.2.1 Resistencia	22
4.2.2 Maquinabilidad	22
4.2.3 Resistencia a la corrosión	22
4.2.4 Conductividad	23
4.2.5 Resistencia al desgaste	23
4.2.6 Soldabilidad	23
4.2.7 Ventajas	23
4.3 ELEMENTOS ALEANTES DEL LATÓN	24
4.4 DESGASTE	26

4.5 EL DESGASTE Y SU CONTROL	26
4.5.1 Adhesión	32
4.5.2 Desgaste de latones	34
4.5.3 Desgaste de metales sin lubricación	36
4.5.4 Coeficiente de fricción	38
4.5.5 Influencia de la rugosidad superficial sobre el desgaste	41
4.6 PRESENTACIÓN DE LOS DATOS DE DESGASTE	43
5. DESARROLLO EXPERIMENTAL	45
5.1 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS	45
5.2 PUESTA A PUNTO DE LA MÁQUINA DE CILINDROS CRUZADOS	46
5.3 PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO DE DESGASTE	47
5.4 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN	48
5.5 RUGOSIDAD	49
5.6 CONFIABILIDAD DE LOS RESULTADOS	50
6. RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS	51
6.1 PERFILES DE DESGASTE	53
6.2 COEFICIENTES DE FRICCIÓN	57
6.3 RUGOSIDADES	58
6.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS	59
6.4.1 Microestructuras de los latones	59
6.4.2 Perfiles de desgaste	61
CONCLUSIONES	67

RECOMENDACIONES	68
BIBLIOGRAFÍA	69
ANEXOS	72

## LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1. Clasificación de los latones	21
Tabla 2. Parámetros de prueba para los ensayos realizados en el tribómetro construido.	46
Tabla 3. Composición química de los latones ASTM B 145 y ASTM B 455 y Acero al carbono.	53
Tabla 4. Propiedades de los materiales utilizados en los ensayos.	53
Tabla 5. Resultados obtenidos de las pruebas de desgaste para los latones a 27°C	57
Tabla 6. Rugosidades del latón ASTM B 145 antes del ensayo.	58
Tabla 7. Rugosidades del latón ASTM B 455 antes del ensayo.	58

## LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1. Diagrama equilibrio Cu – Zn.	24
Figura 2. Abrasión – adhesión. Final de la huella.	26
Figura 3. Interacciones entre los cuatro triboelementos	28
Figura 4. Coeficiente de desgaste calculado y clasificado por Rabinowicz	30
Figura 5. Diagrama de compatibilidad metalúrgica de diferentes parejas de materiales	31
Figura 6. Formación de “proa” característica del desgaste adhesivo.	32
Figura 7. Adhesión que se presenta entre dos superficies en contacto deslizando.	33
Figura 8. Diagrama donde se ilustran las influencias combinadas de carga y velocidad de deslizamiento en el proceso de desgaste deslizando de metales.	36
Figura 9. Tipos de ondulación en las superficies	42
Figura 10. Rugosidad superficial	43
Figura 11. Desgaste Vs tiempo o distancia deslizada.	44
Figura 12. Máquina de cilindros cruzados	45
Figura 13. Micrografía del latón ASTM B 145. 5000X	51
Figura 14. Micrografía del latón ASTM B 455. 200X	52
Figura 15. Perfil de desgaste del acero AISI-SAE 1020, obtenido del ensayo en la máquina de cilindros cruzados.	53
Figura 16. Perfil de desgaste del latón ASTM B 145 – 4A.	54
Figura 16a. Perfil de desgaste del latón ASTM B 145 – 4A, entre 0 y 50 minutos.	54
Figura 17. Perfil de desgaste del latón ASTM B455.	55
Figura 17a. Perfil de desgaste del latón ASTM B 455, entre 0 y 30	

minutos.	55
Figura 18. Perfil de desgaste de los latones ensayados	56
Figura 19. Estado superficial final de las probetas sometidas a desgaste	56
Figura 20. Micrografía del latón ASTM B 145 1000X	59
Figura 21. Micrografía del latón ASTM 455, vista a 1000X	60
Figura 22. Huella de los latones ASTM B 455 y ASTM B 145.	64

## **ANEXOS**

Anexo A. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL LATÓN ASTM B 455	73
Anexo B. REPORTE DEL MANEJO ESTADÍSTICO UTILIZADO EN LA DETERMINACIÓN DE DUREZAS Y DENSIDADES	75
Anexo C. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS SEGÚN LA NORMA ASTM G-83 96.	76
Anexo D. REPORTE DE LA VARIACION DE LOS PERFILES DE DESGASTE	82
Anexo E. REPORTE DE LAS MEDIDAS DE RUGOSIDAD.	83
Anexo F. REPORTE DE LA DETERMINACIÓN DE MICRODUREZAS	85

## RESUMEN

**TÍTULO: EVALUACIÓN DEL DESGASTE ADHESIVO DE LATONES EN UNA MÁQUINA DE CILINDROS CRUZADOS.\***

**AUTOR:** LUNA GAMBOA FRANZ JYHOVANNY.\*\*

**PALABRAS CLAVES:** tribología, desgaste adhesivo, coeficiente de fricción, latones.

### **DESCRIPCIÓN:**

En esta investigación se evaluó el comportamiento tribológico de los latones ASTM B 145 y ASTM B 455. Los ensayos de desgaste fueron realizados en un tribómetro de cilindros cruzados, bajo la norma ASTM G83-96.

Los objetivos fueron determinar la cantidad de material perdido de los latones, determinar los coeficientes de fricción, describir sus perfiles de desgaste y relacionar el comportamiento al desgaste adhesivo de estos materiales con respecto a su microestructura.

En la experimentación las probetas se limpiaron con alcohol y se pesaron en una balanza analítica de precisión (0.0001gr). El desgaste volumétrico se obtuvo como resultado de considerar el desgaste y la densidad de cada uno de los materiales.

Los resultados obtenidos muestran como los elementos aleantes influyeron en el proceso de desgaste, siendo así que el latón ASTM B145, con un contenido de plomo del 5% mostró una menor pérdida de volumen con relación al latón ASTM B 455, con un contenido del 3%.

Además, los coeficientes de fricción encontrados se confrontaron con las tablas de coeficientes calculados y clasificados por Rabinowicz, que para compatibilidad e incompatibilidad de metales, están en el rango de  $10^{-6}$ , rango en el que se sitúan los determinados en este trabajo.

---

\* Investigación

## SUMMARY

**TITLE: EVALUATION OF THE ADHESIVE WEAR OF BRASSES IN A MACHINE OF CROSSED CYLINDERS. \***

**AUTHOR: LUNA GAMBOA FRANZ JYHOVANNY. \*\***

**PASSWORDS:** Tribology, adhesive wear, coefficient of friction, brasses.

### **DESCRIPTION:**

In this investigation the tribologic behavior of the brasses ASTM B 145 and ASTM B 455 was evaluated. The wear tests were carried out in a tribometer of crossed cylinders, under the norm ASTM G83-96.

The aims of this investigation were to determine the mass loss of brasses, the coefficients of friction, to describe their wear profiles and to relate the behavior to the adhesive wear of these materials with regard to their microestructura.

The samples subjected to wear test were cleaned properly with gasoline and then weighed in an analytic scale (0.0001gr). The volumetric wear was obtained as a result of considering the wear and the density of each one of the materials.

The obtained results showed that the elements alloyed influenced in the wear process, being the brass ASTM B145, with a content of 5% Pb, which had less mass loss in relation to the brass ASTM B 455, with a content of 2.5% Pb.

Also, the coefficients of friction obtained were compared with the charts of calculated coefficients and classified by Rabinowicz for compatibility and incompatible metals; they were in the range from  $10^{-6}$ , range in which, these results were calculated in this work

---

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director del Proyecto: Ph. D. Darío Yesid Peña Ballesteros.

\* Investigation

\*\* Physical-chemical ability of Engineering. School of Engineering Metallurgical and Science of materials. Director of the project: Ph.D. Darío Yesid Peña. Co-director: Ing Sandro Báez Pimiento.

## INTRODUCCIÓN

El desgaste es una falla inevitable dondequiera que hayan cuerpos en contacto bajo carga y con movimiento relativo. Normalmente, el desgaste no ocasiona fallas serias, pero trae como consecuencias lo siguiente:

- Reducción de la eficiencia de operación,
- Pérdidas de potencia por fricción,
- Incremento del consumo de lubricantes

Lo que eventualmente conduce al reemplazo de los componentes desgastados y a la obsolescencia de los equipos en conjunto.

Desde el punto de vista de la investigación científico-tecnológica, se ha producido un creciente interés sobre este tema y se ha realizado un esfuerzo considerable en el esclarecimiento de sus causas y en la predicción de sus consecuencias.

Sin embargo, la problemática a la que se enfrenta en nuestro medio es la poca investigación en esta área, pues son muy pocas las universidades o las entidades que financian este tipo de trabajo. Además, se deben establecer canales de comunicación entre la literatura especializada y el laboratorio de investigación, por una parte, y los ingenieros de producción y mantenimiento por la otra, para así poder dilucidar los problemas que se presentan en la industria más rápidamente.

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó una máquina de cilindros cruzados, según la norma ASTM G-83, la cual permite evaluar el desgaste

de varios materiales como acero, latón, bronce, etc; en el presente caso se evaluó el desgaste adhesivo de los latones ASTM B 145 y ASTM B 455, además se calcularon los respectivos coeficientes de fricción y el comportamiento de las microestructuras de las probetas ensayadas con respecto a su modo de desgaste.

## **1. OBJETIVOS.**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el comportamiento al desgaste de los latones ASTM B 145 y ASTM B 455 en una máquina de cilindros cruzados.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Determinar la cantidad de material perdido de los dos latones según norma ASTM G83 - 96.
- Calcular los coeficientes de fricción de los dos latones y sus perfiles de desgaste, debido al desgaste adhesivo.
- Relacionar el comportamiento al desgaste adhesivo de los dos latones con respecto a su microestructura.

## 2. JUSTIFICACIÓN

Uno de los grandes problemas que preocupa en general a la ingeniería es el desgaste de los materiales, debido a que es una de las causas para que los equipos industriales necesiten de mantenimiento. Si se observan los diferentes estudios realizados, se encuentra que al desgaste no se le ha prestado la debida atención y que es el menos estudiado, si se hace la comparación con los otros dos problemas que ocasionan el reemplazo de máquinas y/o sus componentes: fatiga y corrosión.

Muchas investigaciones sobre el desgaste están dedicadas a los aspectos básicos del fenómeno sin embargo, sus resultados no son de aplicación inmediata a nivel industrial. En otros casos, las investigaciones se dedican a aspectos de más rápida aplicación, tales como los efectos de diferentes variables y la evaluación de diversos materiales.

Con base en lo anterior y con la ayuda del material humano de la Universidad Industrial de Santander, entre los que se cuentan profesores, técnicos y estudiantes, así como sus laboratorios y equipos, se pone a disposición este proyecto con el fin de llenar algunos de los vacíos que existen sobre el comportamiento al desgaste de dos latones conocidos a nivel nacional.

### **3. ALCANCE DEL PROYECTO**

El alcance de este proyecto es el de obtener resultados reproducibles del desgaste producido entre parejas de un mismo metal con los cuales se pueda tener una guía que sirva para futuras investigaciones las cuales serán cada vez mas profundas, tratando de entender el significado y la importancia de la tribología en nuestro entorno, abriendo un espacio para la creación de un laboratorio de tribología de la universidad, con el fin de captar el interés de los estudiantes de ingeniería metalúrgica y mecánica en este campo de estudio que se tiene descuidado, y del mismo modo, poder ofrecer una alternativa a la industria para el estudio tribológico de sus productos y equipos.

## 4. MARCO TEORICO

### 4.1. LATÓN

El *latón* es una aleación de cobre y zinc en diferentes proporciones dependiendo de su uso posterior. Esta aleación se utiliza en orfebrería, grifería, válvulas, piezas de contadores, etc. Los latones industriales tienen un amplio rango de aleaciones de cobre y zinc, sus propiedades varían desde las del cobre, casi puro, a las de los latones especiales de alta resistencia, que se logran por la adición de combinaciones adecuadas de elementos tales como el estaño, plomo, hierro, manganeso, níquel, aluminio y silicio.

En cuanto a su estructura y de acuerdo a su tenor de zinc, los latones pueden clasificarse en tres grupos principales utilizados en la industria:

- Latones alfa ( $\alpha$ ), con contenidos de zinc de 5% a 35%, se caracterizan por su fácil deformación en frío, y ductibilidad.
- Latones alfa + beta ( $\alpha+\beta$ ), con contenidos de zinc de 35% a 45%, se deforman plásticamente en caliente, siendo muy resistentes en frío e ideales para piezas forjadas y mecanizadas por presentar una mayor dureza.
- Latones beta ( $\beta$ ), con contenidos de zinc de 45% a 50%, donde la fase  $\beta$  es dura pero tenaz a temperatura ambiente y dúctil por encima de 454 °C, se deforman muy bien en caliente pero son demasiado frágiles en frío.

En las tabla 1 se observa la clasificación de algunos latones y sus principales ventajas.

Tabla1. Clasificación de los latones utilizados en este proyecto \*

<b>ALEACIONES Cu – Zn</b>	
ALEACION	VENTAJAS
Latón rojo al plomo ASTM B 145 Fase $\alpha$ (hasta un 35 % de Zn)	Aumenta las características mecánicas
	Mantiene la resistencia
	Disminuye la conductividad térmica.
Latón arquitectónico ASTM B 455 Fase $\alpha + \beta$ (entre un 35 – 45 % de Zn)	Aumenta la resistencia con una fase $\beta$ ordenada

\* <http://www.geocities.com/eleccodes/intro.htm>

El latón es un material perfecto para uso en medio ambientes clínicos como hospitales, debido a la acción bacteriostática del cobre, que inhibe el desarrollo de la mayoría de los microorganismos.

El control y la combinación de estas propiedades físicas y mecánicas dan lugar a productos de calidad, que ofrecen una larga vida útil y excelente

fiabilidad a bajo costo. A continuación se analizan algunas de sus propiedades.

## **4.2. PROPIEDADES DEL LATÓN**

**4.2.1. Resistencia mecánica:** Los latones cuando están recocidos son dúctiles y resistentes, pero cuando han sido endurecidos por técnicas de trabajo en frío su dureza y resistencia aumentan significativamente. Se pueden ensamblar estructuras resistentes y rígidas a partir de secciones extruídas y trefiladas. La resistencia de los latones se mantiene hasta los 200° C y se reduce en aproximadamente en un 30% a 300° C, lo cual los colocan en ventaja con materiales alternativos. Para aplicaciones que demandan las más altas resistencias se utilizan los "latones de alta resistencia", que contienen adiciones de elementos aleantes los cuales mejoran sus propiedades.

**4.2.2. Maquinabilidad:** A pesar que los latones son intrínsecamente fáciles de mecanizar, la adición de pequeñas cantidades de plomo mejora aún más esta propiedad dando origen a los latones de "fácil mecanizado". Estos son universalmente aceptados cuando se comparan con distintos materiales en los cuales es importante esta condición. Además, permiten que las tolerancias sean mantenidas durante su producción con un excelente acabado superficial.

**4.2.3. Resistencia a la corrosión:** La exposición atmosférica de los latones produce una película superficial muy delgada debido a la formación de una capa protectora impermeable a base de carbonato básico de cobre (cardenillo); que con el transcurrir del tiempo forma una película fina de color verde, la cual es atractiva visualmente, como en las fachadas de los edificios. El latón tiene gran uso para la fabricación de tubos, accesorios, válvulas, etc.

En cañerías de uso domésticos, centrales de calentamiento, condensadores de vapor y plantas de desanilización. Los latones de alta resistencia que contienen magnesio tienen una excelente resistencia a la corrosión atmosférica.

**4.2.4. Conductividad:** Los latones tienen una buena conductividad térmica y eléctrica y son en estos aspectos superiores a las aleaciones ferrosas y a las de base níquel y titanio. Su alta conductividad, combinada con su resistencia a la corrosión, los hacen ideales para la manufactura de equipos eléctricos, ya sean domésticos o industriales, como los tubos de intercambiadores de calor y condensadores.

**4.2.5. Resistencia al desgaste:** La presencia de plomo en los latones tiene un efecto lubricante que da como resultado una baja fricción y bajo desgaste. Estas propiedades son importantes en la fabricación de piñones y engranajes utilizados en instrumentos y relojes. Los latones especiales que contienen adiciones de silicio son ideales para la fabricación de cojinetes para trabajos pesados.

**4.2.6. Soldabilidad:** Los latones pueden ser unidos a otra aleación de cobre u otros metales por medio de varios procesos comerciales de unión tales como remachado, soldadura blanda, soldadura de plata y soldadura por fricción. También se usan técnicas con adhesivos especiales.

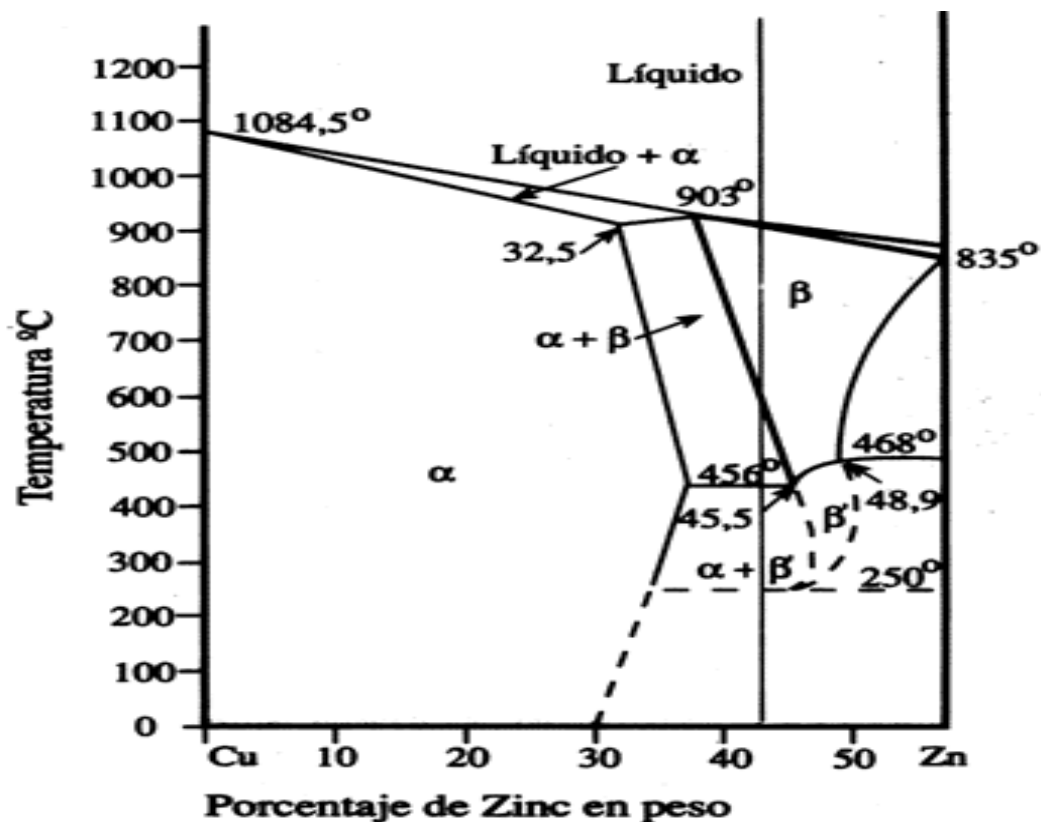
**4.2.7. Ventajas:** Las principales ventajas que se encuentran en el latón son:

- ❖ Resistente al desgaste
- ❖ Económico
- ❖ Sustituye el acero o hierros, que tiendan a oxidarse en el medio
- ❖ Excelente propiedad de mecanizado.

### 4.3. ELEMENTOS ALEANTES DEL LATÓN

En la figura 1 se muestra el diagrama de equilibrio cobre-zinc, donde las dos fases predominantes son las llamadas alfa y beta. La fase alfa es una fase rica en cobre que es muy dúctil a temperatura ambiente y sólo moderadamente plástica (dúctil) a temperatura elevada. La fase beta es una fase rica en zinc, dura y quebradiza a temperatura ambiente, pero extremadamente dúctil a alta temperatura. Teniendo presente estas características se da una breve reseña de los materiales que se utilizaron en este proyecto.

Figura 1 Diagrama de equilibrio Cu-Zn



El latón ASTM B 455 tiene buena resistencia y aceptable ductilidad a temperatura ambiente (mezcla de alfa y beta) y es muy dúctil a temperatura elevada (estructura rica en fase beta, >50%).

El latón ASTM B 145 tiene una moderada resistencia mecánica y buena maquinabilidad. Esto se puede deducir debido a su composición aproximada de 85% de cobre y 5% de zinc.

Después de esta breve reseña se puede observar que estos materiales son latones especiales y como tales contienen algunos de los siguientes elementos: Fe, Al, Mn, Sn, Ni, Si, en proporciones superiores al 1% y otros elementos como el As y Co en proporciones inferiores. Estos elementos se adicionan para mejorar las características del metal o su resistencia a la corrosión. La presencia de plomo en los latones tiene un efecto lubricante que da como resultado una baja fricción y bajo desgaste. A temperatura ambiente el plomo es insoluble en la estructura del latón, segregándose en los intersticios como partículas discretas, propiedad que se aprovecha para que actúe como rompe-virutas durante el maquinado.

La influencia del plomo o de impurezas de bajo punto de fusión, como el bismuto, puede afectar la estructura del metal con el aumento de la temperatura; en los latones de fase alfa (>63,5% de cobre), cuando se trabaja en caliente, está limitado a contenidos menores del 0,01%, pues a esas temperaturas, el plomo estaría en forma de partículas fundidas dando lugar a fisuras íntergranulares. Esto no ocurre en los latones bifásicos porque el plomo es soluble en la fase beta hasta aproximadamente un 2%. Además, la adición de otros elementos a la aleación afectará la distribución de las fases.

#### 4.4. DESGASTE

Además de la carga normal, área del contacto, velocidad de desgaste y tiempo de ensayo, muchos otros factores deben ser considerados y monitoreados en un ensayo de desgaste. La temperatura del ensayo es importante debido a que puede influir en las propiedades mecánicas de los materiales y en los procesos químicos que se activan térmicamente. La composición atmosférica es muy importante, componentes reactivos como el vapor de agua y el oxígeno influyen fuertemente mecanismos y velocidades de desgaste en todos los tipos de materiales<sup>1</sup>.

#### 4.5. EL DESGASTE Y SU CONTROL

El desgaste se puede definir como el deterioro de un material debido al uso, en la mayoría de los casos se puede considerar como el desprendimiento de partículas, de la superficie de un cuerpo y/o el desplazamiento de material de las zonas en contacto hacia las zonas libres de carga. En la figura 2 se puede observar un desgaste combinado de abrasión y adhesión.

Figura 2. Abrasión-adhesión. Final de huella



\* <http://www.geocities.com/elecodes/intro.htm>

---

<sup>1</sup> Hutchings, Ian. M. Tribology: friction and wear of engineering materials. Great Britain, 1992. pág 81.

Existen una serie de factores que influyen en un proceso de desgaste, los cuales se deben tener en cuenta para un mejor estudio o evaluación de este proceso, y es por eso que en el presente proyecto se utilizará el enfoque que hizo Czichos<sup>2</sup>, el cual considera algunos factores que influyen en el desgaste como son:

1. Variables operacionales.

- Carga aplicada.
- Velocidad.
- Temperatura y
- Tipo de Movimiento.

2. Variables estructurales del sistema tribológico.

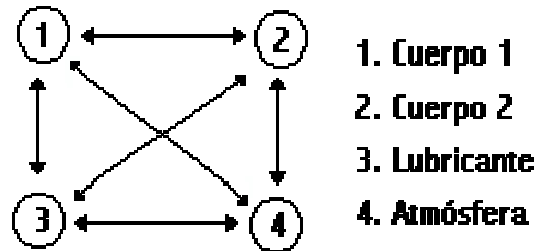
- Propiedades volumétricas de los dos cuerpos en contacto.
  - Geometría.
  - Dimensiones.
  - Composición química.
  - Microestructura.
  - Dureza, etc.
- Propiedades superficiales de los cuerpos en contacto.
  - Rugosidad
  - Microdureza, etc.
- Área de contacto entre los cuerpos.
- Propiedades de los lubricantes interpuestos.
- Características de la atmósfera.
- Interacciones entre los cuatro posibles triboelementos.

---

<sup>2</sup> Czichos, H.; "A systems analysis data sheet for friction and wear tests and an outline for simulative testing", (5th meeting of IRG-OECD at CNRS, Paris, Abril 1976), Source Book on Wear Control Technology, Rigney, D.A. y Glaeser, W.A. (Editores), American Society for Metals, E.E.U.U. (1978), pp. 22-39.

Este enfoque se ve representado por la figura 3, en la cual se observan los triboelementos que conforman un tribosistema.

Figura 3. Interacciones entre los cuatro tribo-elementos.



Las tendencias en la investigación de desgaste de materiales han llevado a los investigadores a hacer una estimación de los principales procesos de desgaste. Eyre<sup>3</sup> ha realizado una clasificación con base en la importancia relativa de los distintos tipos de desgaste en la industria:

Abrasión	50 %
Adhesión	15 %
Erosión	08 %
Desgaste micro-oscilatorio ("Fretting")	08 %
Desgaste químico	05 %

Si estas estimaciones son correctas se puede especular sobre el porque del interés en el desgaste deslizante es el mas alto comparado con otros tipos de desgaste. En primera instancia, el desgaste deslizante es mas complejo mecánicamente comparado con otras formas de desgaste, debido a que éste involucra no solamente corte y surcos incluidos en el desgaste abrasivo, sino también la adición de asperezas, terceros cuerpos (partículas de desgaste),

<sup>3</sup> Eyre, T.S.; "Wear characteristics of metals", (Tribology International, Oct. 1976), Source Book on Wear Control Technology, Rigney, D.A. y Glaeser, W.A. (Editores), American Society for Metals, E.E.U.U. (1978), pp. 1-10.

iniciación y crecimiento de grietas subsuperficiales (por ej, procesos de fatiga por contacto), transferencia de material hasta y desde la superficie, cambios sutiles en la rugosidad superficial durante el funcionamiento, formación de películas triboquímicas y otros procesos. En segunda instancia, las máquinas de ensayos para el desgaste deslizante son fáciles de construir, comparadas con, por ejemplo, los probadores de erosión, impacto o fretting. Por lo tanto, los investigadores en materiales interesados en comenzar estudios de desgaste, podrían obtener sus primeros datos mas rápidamente y con menos esfuerzos de diseño en las máquinas mismas; y tercero, es conveniente aclarar que existen procesos en los cuales uno de estos tipos se transforma en otro, en dos, ó varios de ellos coexistiendo al mismo tiempo.

En varios de estos tipos de desgaste se han observado dos regímenes de comportamiento claramente diferenciados; estos regímenes han sido denominados Desgaste Suave y Desgaste Severo. En el último de ellos se han detectado velocidades de desgaste de 4 a 100 veces mayores que en el primero. Es obvio, la importancia de predecir en cual de estos regímenes de desgaste va a operar un determinado sistema tribológico, a fin de aprovechar los materiales de la manera más efectiva. Actualmente se recomienda, con base en patrones establecidos y en conocimientos publicados en revistas técnicas, realizar ensayos de simulación acelerados en el laboratorio, utilizando la microtopografía de las superficies desgastadas y/ó las partículas de desgaste; como base para la calibración de los ensayos. También se ha recomendado la importancia de calcular el Coeficiente de Desgaste  $k$  (modelo de desgaste adhesivo de Archard<sup>4</sup>), como herramienta predictiva y de diagnóstico, el cual entabla una proporcionalidad entre el volumen de desgaste producido durante el deslizamiento ( $V$ ) y la carga aplicada ( $L$ ), la dureza ( $H$ ) y la distancia deslizada ( $s$ ):

---

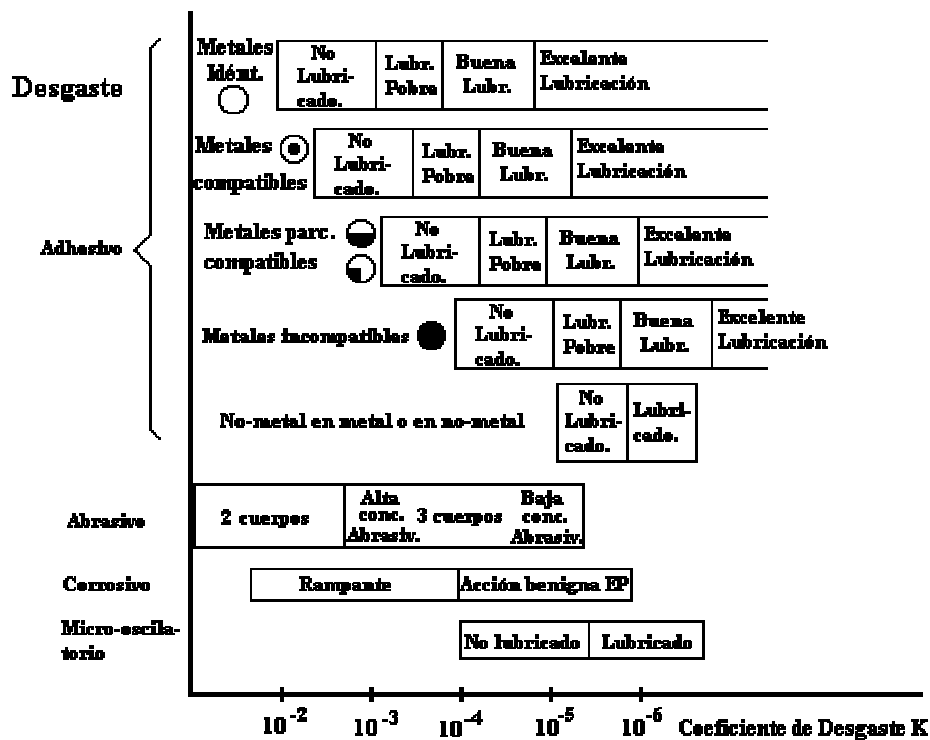
<sup>4</sup> Fifty years of research on the wear of metals, Tribology International Vol. 30, No 5, pp, 321-331, 1997. Elsevier Science Ltd. Great Britain

$$k = \frac{V * H}{L * s} \quad (1)^5$$

donde k representa la probabilidad que, del encuentro entre dos asperezas de las superficies en contacto, se produzca una partícula de desgaste; V es el volumen desgastado, en una distancia deslizada s, por una superficie de dureza H, bajo una fuerza normal L.

Sin embargo, fue Rabinowicz<sup>6</sup>, quien calculó y clasificó este coeficiente, dentro de una dispersión relativamente alta, basándose en la gran cantidad de resultados publicados por diversos autores, como se muestra en la figura 4.

Figura 4. Coeficiente de desgaste calculado y clasificado\* por Rabinowicz.



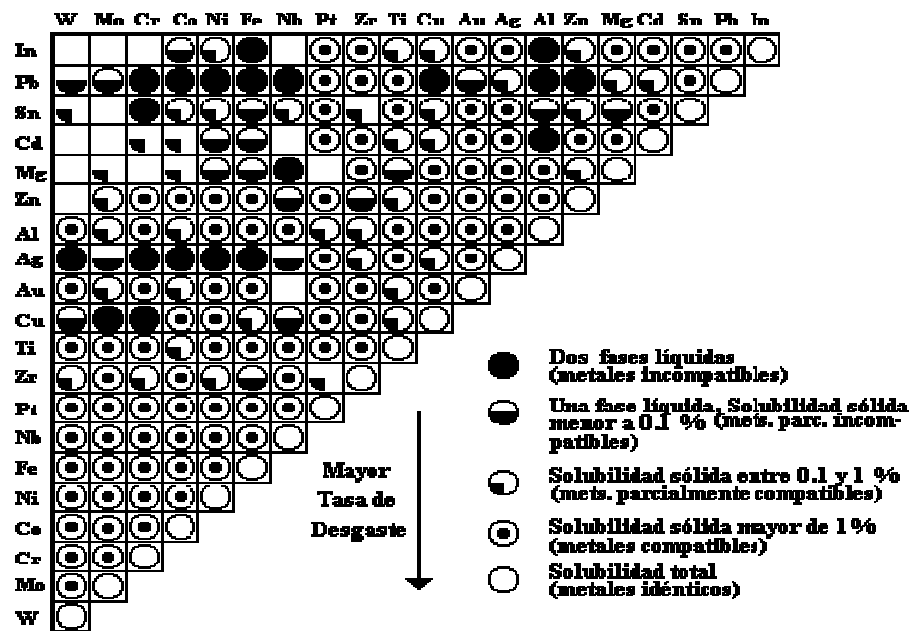
\* Por Rabinowicz, E.; Wear Coeficientes - Metals; Wear Control Handbook; Ed. M.B. Peterson, ASME, New York, [1980]; pp. 475-506.

<sup>5</sup> Archard J.F. Contact and rubbing of flat surfaces. J. Appl. Phys., 1953, 24, 981-988

<sup>6</sup> Rabinowicz, E.; "The wear coefficient - Magnitude, Scatter, Uses"; Journal of Lubrication Technology, Transactions of the ASME, V. 103, N° 2, (1981), pp. 188-194.

De esta manera elaboró una tabla que permite determinar si el coeficiente de desgaste  $k$  calculado, para un sistema determinado, está dentro de los límites esperados; esta clasificación permite analizar diferentes parejas de metales, con base en su compatibilidad metalúrgica (solubilidad mutua de los metales), para diversos tipos de desgaste como se presenta en la figura 5. El enfoque propuesto por este investigador permite determinar el tipo de desgaste, el mecanismo del proceso y la efectividad de la lubricación. Con base en éste, se puede tomar la decisión de sustituir uno ó los dos materiales en contacto, para mejorar el sistema de lubricación y para estudiar las características del movimiento y cargas del sistema tribológico, en el caso de que el análisis produzca resultados inesperados.

Figura 5. Diagrama de compatibilidad metalúrgica de diferentes parejas de materiales\*



\* Por Rabinowicz, E.; Wear Coeficientes - Metals; Wear Control Handbook; Ed. M.B. Peterson, ASME, New York, [1980]; pp. 475-506.

Notas:

- Los círculos incompletos indican información insuficiente, con base en el diagrama binario de fases

- La compatibilidad metalúrgica es inversa a la compatibilidad tribológica.

**4.5.1. Adhesión:** En este caso, el movimiento relativo puede ser un deslizamiento unidireccional o de vaivén, o bien, bajo carga en contacto oscilatorio de pequeña amplitud. Se sabe que las rugosidades superficiales que coinciden fluyen plásticamente y forman fuertes uniones endurecidas por el trabajado. A medida que éstas se rompen, bajo la tracción tangencial impuesta, los sólidos van perdiendo material. En la figura 6 se puede observar en detalle la formación llamada "proa" característica de este tipo de desgaste.

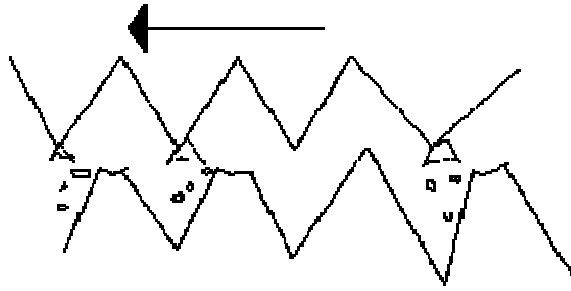
En general, el desgaste adhesivo, también llamado desgaste por fricción ó desgaste deslizante, es una forma de deterioro que se presenta entre dos superficies en contacto deslizante como se muestra en la figura 7.

Fig. 6. Formación de "proa" característica de desgaste adhesivo\*.



\* <http://www.geocities.com/eleccodes/intro.htm>

Figura 7. Adhesión entre dos superficies en contacto deslizante.



Este tipo de desgaste toma lugar en cojinetes de deslizamiento, chumaceras, bujes, motores de combustión interna, compresores, bielas, tornillos de potencia, matrices, engranajes, guías en general, etc.

Según la teoría adhesiva del desgaste deslizante<sup>7</sup>, bajo la acción de las cargas normales aplicadas, las asperezas de las dos superficies sufren fluencia plástica y soldaduras en frío; al producirse el movimiento, las uniones soldadas se rompen por cizalladura. De esta manera, las superficies se cubren de una película transferida del material de la contracara, a la vez que se desprenden partículas en el proceso. Se cree que otros mecanismos, como abrasión y fatiga superficial son responsables por el desprendimiento de partículas de la película transferida; sin embargo, existen otras teorías que tratan de explicar de maneras diferentes esta forma de desgaste y la formación y remoción de las partículas.

Por último, es necesario señalar que debido a que en el desgaste de tipo deslizante se presentan situaciones donde la abrasión es importante, se hace necesario tener en cuenta algunos de los factores que disminuyen la abrasión por partículas abrasivas como son<sup>8</sup>:

---

<sup>7</sup> KRAGELSKI. I. V. Friction and Wear, London 1965, pág 126

<sup>8</sup> Sección 4.5.1 tomado y adaptado de <http://www.geocities.com/elecodes/intro.htm>

- La relación entre la dureza de la superficie y del abrasivo.
- El tamaño de las partículas abrasivas.
- La forma de las partículas.
- La velocidad.
- La carga.

**4.5.2. Desgaste de latones:** El comportamiento deslizante de los principales latones  $\alpha/\beta$  en contacto con una superficie dura y lisa, es reproducible y ha sido estudiada por investigadores como Sarkar A D<sup>9</sup>, Tabor D, Hodgson M J y Eyre T S, entre otros.

Analizando el desgaste desde el punto de vista de la carga aplicada se puede decir que a bajas cargas, la velocidad de desgaste aumenta con el aumento de la carga normal, de acuerdo con la ecuación de Archard,  $Q = KW/H$ , en donde  $k$  es el coeficiente de fricción,  $H$  es la dureza,  $W$  es la carga normal y  $Q$  es el calor desprendido.

A cargas más altas, hay un repentino aumento en la velocidad de desgaste; cuando la carga se incrementa, el comportamiento aún sigue la ecuación de Archard, pero con un mayor coeficiente de desgaste. La transición en la velocidad de desgaste está relacionada con una caída en la resistencia de contacto, la cual llega a ser constante a valores muchos más bajos para cargas anteriores a la carga de transición. La rugosidad superficial también muestra un marcado cambio.

El régimen de desgaste a bajas cargas, por debajo de la transición, es llamado desgaste suave, mientras que a mayor velocidad o carga, por encima de la transición, es llamado desgaste severo. El desgaste suave se caracteriza por presentar partículas de desgaste finas (de  $0.01 \mu\text{m}$  hasta  $1$

$\mu\text{m}$ ) las cuales son por lo general óxidos. El desgaste severo resulta en partículas mucho más grandes, entre  $20 \mu\text{m}$  y  $200 \mu\text{m}$  en tamaño, los cuales pueden ser visibles. La principal diferencia entre estos regímenes es la naturaleza de las virutas y las velocidades de desgaste, las cuales pueden diferir por un factor de 100 o incluso 1000. Las velocidades de desgaste debido al desgaste severo siempre son altas, lo cual hace al material completamente inaceptable en aplicaciones ingenieriles, con coeficientes de desgaste adimensionales de  $10^{-2}$  hasta  $10^{-3}$ . La transición entre desgaste suave y desgaste severo resulta de un cambio en la naturaleza del contacto deslizante; en el régimen de desgaste severo la velocidad de desgaste del cuerpo más duro es insignificante.

En el desgaste suave las superficies deslizantes están separadas por películas de óxidos, con contacto metálico directo ocasional; ésto explica la relación de una alta resistencia de contacto con un bajo coeficiente de fricción. En el deslizamiento sin lubricación del latón sobre el acero, por ejemplo, el coeficiente de fricción, el cual será visto en más detalle en la sección 4.5.4, es de 0.15 en el régimen de desgaste suave, y de 0.25 a 3, en el desgaste severo. Las virutas formadas por el desgaste suave consisten de una mezcla de óxidos de cobre, zinc y hierro, provenientes del latón y el acero, con velocidades de desgaste que son reproducibles a pesar de tener diferentes durezas.

**4.5.3. Desgaste de metales sin lubricación:** Las transiciones en los mecanismos de desgaste dominante y en las velocidades de desgaste asociadas, cambian con la variación de la carga normal y la velocidad de deslizamiento; y en algunos casos con la variación del deslizamiento o distancia deslizada. Los principales factores que controlan estos mecanismos son: las tensiones mecánicas, la temperatura y los fenómenos de oxidación.

---

<sup>9</sup> Sarkar A.D. Desgaste de metales. Limusa, Mexico, 1990. pág 189.

La complejidad del desgaste deslizante surge del hecho que los tres factores controlantes se interrelacionan y además pueden estar influenciados por la carga y la velocidad de deslizamiento. La figura 8 ilustra esquemáticamente la magnitud del daño mecánico debido a tensiones superficiales y la temperatura, las cuales dependen de la carga y la velocidad de deslizamiento. Un incremento en la carga conlleva directamente a esfuerzos mayores, produciendo daños mecánicos más severos.

Fig. 8. Diagrama combinado de carga y velocidad de deslizamiento en el proceso de desgaste deslizante en metales.



La velocidad de deslizamiento determina la importancia de la conducción de calor lejos de la interfaz. A bajas velocidades de deslizamiento, el calor generado será disipado, relativamente rápido y la temperatura de la interfaz permanecerá baja; promoviendo un proceso de deslizamiento isotérmico. A altas velocidades, la conducción de calor es limitada, la temperatura de la interfaz es por lo tanto alta, promoviendo un proceso adiabático. Una temperatura alta conduce a una reactividad química alta de las superficies, causando un rápido crecimiento de películas de óxido, lo cual reducirá la tensión mecánica de las asperezas y materiales cercanos a la superficie y

pueden incluso, en casos extremos, causar fusión. Las tensiones mecánicas importantes son la tensión normal en la superficie de cada cuerpo deslizante, y los esfuerzos cortantes en y debajo de la superficie. La tensión normal en los contactos de asperezas, puede ser plástico o elástico. La carga normal aplicada a los sistemas controla la magnitud del flujo plástico en las asperezas en contacto; si la carga es suficientemente baja, el desgaste será muy lento, quizás por un proceso elástico (ciclos altos de fatiga). La magnitud y la posición del máximo esfuerzo cortante dependerán del coeficiente de fricción. Para  $k$  menor que  $\sim 0.3$ , el máximo esfuerzo cortante asociado al flujo plástico estará bajo la superficie y la deformación plástica acumulada por cada deslizamiento será pequeña. Esta condición es típica para un sistema lubricado o para uno que lleve una capa de óxido protectora. Para  $k$  mayor que  $\sim 0.3$ , sin embargo, el máximo esfuerzo cortante estará en la superficie y por lo tanto, puede acumularse grandes esfuerzos cortantes.

Muchos mecanismos de desgaste dominados por flujo plástico han sido propuestos, involucrando la adhesión y cizallamiento de asperezas como fue demostrado por Archard<sup>10</sup>, nucleación y crecimiento de grietas subsuperficiales (desgaste por delaminación) y otros modelos que involucran la propagación de grietas por fatiga. A bajas velocidades de deslizamiento y altas cargas, prevalecen estos mecanismos de desgaste conllevando a un desgaste severo, como puede ocurrir en el caso de los latones. Los fenómenos de oxidación son muy importantes en el desgaste deslizante y su velocidad de crecimiento depende, fuertemente de la temperatura; sin embargo, la temperatura local en la interfaz deslizante puede ser mayor que la de los alrededores y puede ser aún mayor en las asperezas en contacto. Este aumento de la temperatura varía con la rapidez de deslizamiento<sup>11</sup>.

---

<sup>10</sup> Archard J F, JI Appl Physics, 1953, 24, 1981.

<sup>11</sup> Hutchings, Ian. M. Tribology: friction and wear of engineering materials. Great Britain, 1992. pág 92

**4.5.4. Coeficiente de fricción:** La fuerza de fricción es igual a la suma de la resistencia por acción intermolecular (componente molecular de la fricción) y la resistencia por deformación de las capas superficiales penetradas por las microirregularidades (componente mecánico de la fricción). En cada irregularidad la fuerza de fricción es<sup>12</sup>:

$$F_f = K_M + K_D \quad (2)$$

$K_M$  = Componente molecular.

$K_D$  = Componente mecánico.

El componente mecánico se origina por la formación de los surcos o estrías, cuando unas irregularidades penetran en otras. Según Bowden y Tabor, “la carga normal  $W$ , se compensa con el límite de fluencia del metal en dirección normal  $\sigma_{tn}$ , actuando sobre la superficie real de contacto  $A_r$ ”.<sup>13</sup>

$$W = A_r \sigma_{tn} \quad (3)$$

Además, la fuerza de fricción  $F_f$ , tangencial al movimiento, será igual al límite de fluencia del metal en la dirección tangencial  $\sigma_{tT}$ , actuando sobre el área de la sección transversal de los surcos  $A_g$ .

$$F_f = A_g \sigma_{tT} \quad (4)$$

Considerando que las propiedades mecánicas del metal son iguales en todas sus direcciones (material isótropo), la componente deformacional del coeficiente de fricción será:

---

<sup>12</sup> MARTINEZ PEREZ, Francisco. La tribología, ciencia y técnica para el mantenimiento. Limusa, Mexico, 1957. pág 47

<sup>13</sup> Ibid. p. 44

$$K_D = F_f/W = A_g/A_r \quad (5)$$

En este modelo el valor de  $K_D$  se determina por la relación de áreas  $A_g/A_r$ , que depende de la forma de las irregularidades. Durante el contacto deslizante de dos materiales blandos y relativamente limpios, la unión adhesiva de los microcontactos depende del grado de penetración de las irregularidades y de la composición de las superficies. Al producirse el deslizamiento, la fuerza de fricción producirá el corte o cizallamiento de los planos tangenciales más débiles de la superficie de contacto real.

Si  $R$  es la resistencia media al corte en los planos más débiles del área de contacto, la superficie total donde actúa es prácticamente igual al área real de contacto, y si se desprecia la influencia en el incremento del área de contacto, puede plantearse que la componente molecular del coeficiente de fricción sea:

$$K_M = \tau_n A_r \quad (6)$$

Si se considera que el contacto se encuentra en estado plástico, la superficie real de contacto se determina así:

$$A_r = W/\sigma_t \quad (7)$$

Donde  $\sigma_t$  es el límite de fluencia. Entonces la componente molecular del coeficiente de fricción será:

$$K_M = Ft/W = \tau_n/\sigma_t \quad (8)$$

La resistencia al corte  $\tau_n$  de la superficie de la separación de materiales que no se endurecen por deformación es prácticamente igual al esfuerzo cortante

crítico  $\tau$  del metal. El límite de fluencia  $\sigma_t$  es un valor cercano a  $5\tau$ . De aquí, se deduce que  $K_M$  es aproximadamente igual a 0.2. Este valor debe considerarse solo como el límite inferior de la componente adhesiva del coeficiente de fricción en los metales técnicamente puros, ya que para metales realmente puros el coeficiente de fricción alcanza valores entre 40 y 100, debido al incremento del área de contacto. Además, si se utiliza lubricación, este coeficiente puede disminuir a valores de 0.02. Como se puede ver, la fricción depende directamente del área real de contacto. Por lo tanto, se puede afirmar que la fricción será en muchos casos prácticamente independiente del área nominal o aparente de contacto y aumenta con la fuerza normal  $W$ , y también depende de la variación de las características deformacionales y adhesivas de las superficies en contacto. Sobre el coeficiente de fricción influirá, el tercer cuerpo que interactúa con los sólidos deslizantes, produciendo variaciones en la topografía de las superficies, en su composición y en las propiedades de resistencia.

En el contacto plástico sin desgarre, la componente deformacional del coeficiente de fricción se debe a la resistencia al cambio de forma de las capas superficiales del elemento mas blando del par. El coeficiente de fricción se puede calcular con una muy buena aproximación por la siguiente ecuación:

$$K = K_M + 0.5\Delta^{1/2}(P_c/HB)^{1/4} \quad (9)$$

$P_c$  = Presión de contorno.

En el contacto plástico con desgarre, el coeficiente de fricción se puede evaluar por la siguiente expresión:

$$K = K_M + 0.9\Delta^{1/2}(P_c/HB)^{1/2} \quad (10)$$

Donde  $\Delta$  para ambos casos es:

$$\Delta = (2.7HB^{5/2})/(P_c^{1/2}E^2) \quad (11)$$

Donde E = modulo de elasticidad del material.

**4.5.5. Influencia de la rugosidad superficial sobre el desgaste:** Un factor muy importante e influyente en la comprensión del mecanismo de desgaste es saber que nunca se encontrará una superficie perfectamente plana a nivel microscópico aunque se hayan preparado con métodos finos como el maquinado, pulido, etc. Toda superficie presenta ciertas deformaciones como ondulaciones en forma de colinas y valles<sup>14</sup>, ver figura 9. La superficie en (a) se considera plana perfectamente lisa, la (b) lisa y las (c), (d) y (e) planas rugosas con diferentes longitudes de onda que indican el grado de rugosidad. En superficies reales la altura de las crestas está entre 0.05 y 50  $\mu\text{m}$  y su espaciamento entre 0.5  $\mu\text{m}$  y 5 mm.

La rugosidad de una superficie se determina de acuerdo a la figura 10 y se describe de la siguiente forma<sup>15</sup>:

$R_t$  = Altura máxima de una cresta a un valle.

$R_s$  = Raíz cuadrática media.

Una forma práctica para encontrar la altura promedio de las ondulaciones superficiales es estableciendo  $R_s$ , según la siguiente expresión:

$$R_s = (1/l \int_0^l y^2 dx)^{1/2} \quad (12)$$

---

<sup>14</sup> SARCAR, A.D. Desgaste de metales. Limusa, México, 1990. pág 28.

Figura 9. Tipos de ondulación en las superficies.

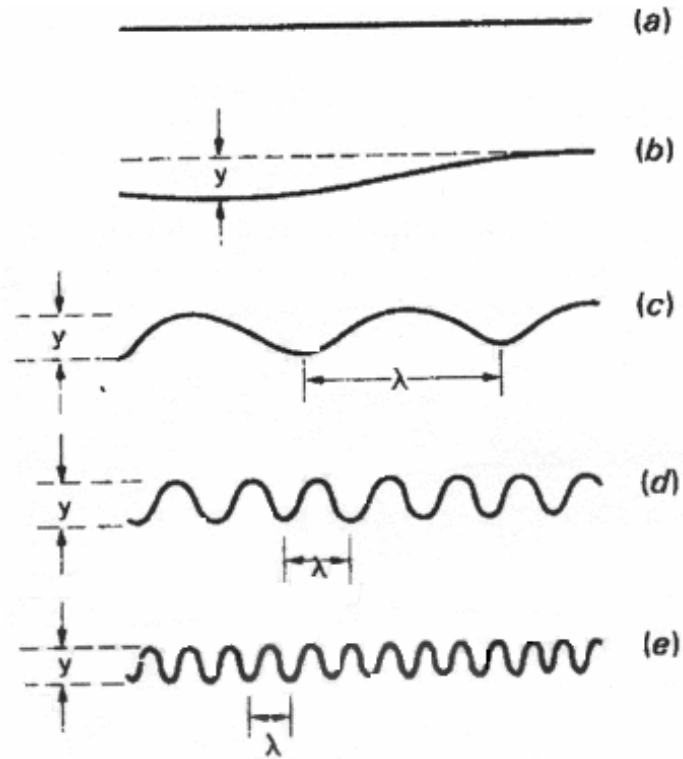
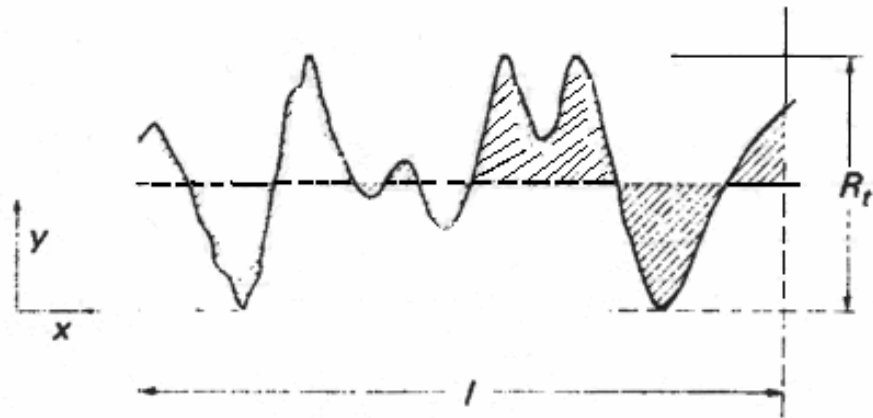


Figura 10. Rugosidad superficial.



<sup>15</sup> SARCAR, A.D. Desgaste de metales. Limusa, México, 1990. pág 78.

#### 4.6. PRESENTACIÓN DE LOS DATOS DE DESGASTE.

Existen varias formas de presentar los resultados de los ensayos, entre los que están los tribográficos y los diagramas de transición ó tribomapas; los tribográficos son la representación gráfica de una medida cuantitativa del desgaste como función de:

1. Parámetros operacionales (carga, velocidad, temperatura, tiempo).
2. Parámetros estructurales (tipo de material, dureza, rugosidad, microestructura).
3. Parámetros de interacción (esfuerzos de contacto, espesor y radio de las asperezas, modos de lubricación).

Los tribográficos hacen énfasis en la dependencia de los datos obtenidos con cualquiera de los tres parámetros mencionados. En la dependencia de los datos con el tiempo, es posible obtener dos tipos de curvas:

1. Curva de fricción Vs tiempo.
2. Curva de desgaste Vs tiempo.

En esta investigación, la presentación de los datos se realizará por medio de tribográficos enfatizados en la dependencia de los datos obtenidos con el tiempo y se utilizarán las curvas de desgaste vs tiempo.

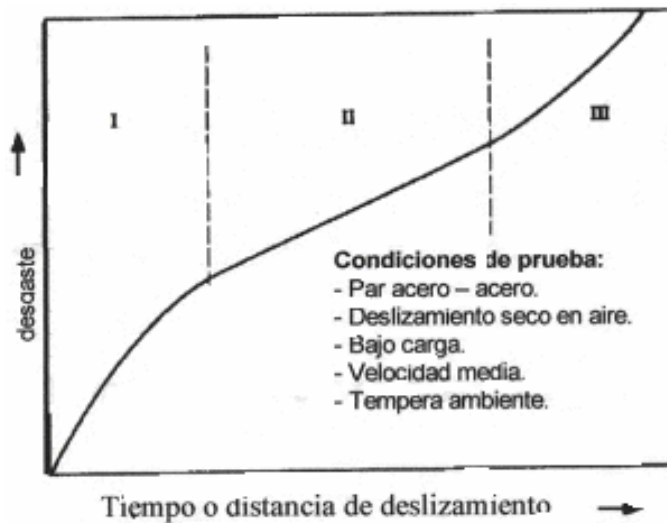
**Curva desgaste Vs tiempo:** La curva típica, durante el deslizamiento seco de sistemas metal-metal, consiste de tres etapas de desgaste; ver figura 11.

**Etapa 1:** Esta etapa corresponde a un período de incubación o de asentamiento, es una etapa de no equilibrio y representa solo una pequeña

porción del tiempo de operación del par. El desgaste sigue una función exponencial.

**Etapa 2:** Es la etapa mas larga de la prueba y sigue un régimen de desgaste lineal.

Figura 11. Desgaste Vs tiempo o distancia deslizada



**Etapa 3:** A esta etapa se le considera como de desgaste catastrófico, se asume que el volumen de material removido de la superficie como partículas de desgaste, es proporcional al área real de contacto.

El desgaste adhesivo ocurre cuando existen dos superficies en contacto, seguido de la remoción de material hasta la ruptura de uno de ellos. Este tipo de desgaste es descrito por la siguiente ecuación<sup>16</sup>.

$$V=K(P*S)/H \quad (14)$$

V = Volumen de desgaste en mm<sup>3</sup> o in<sup>3</sup>.

S = Distancia de desgaste en mm o in.

P = Carga en Kg o Lb.

H = Dureza del material.

K = Coeficiente de fricción.

## 5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para el presente proyecto se utilizó la máquina de cilindros cruzados, la cual fue diseñada y construida por el Ingeniero Sandro Báez y esta ubicada en el laboratorio de metalurgia de la escuela de Ingeniería Metalúrgica, ver figura 12.

Figura 12. Máquina de cilindros cruzados.



### 5.1. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

Se utilizaron probetas cilíndricas de latón 85-5-5-5 fabricado bajo la norma ASTM B 145 – 4A y latón 60/40 fabricado bajo norma ASTM B 455 (UNS

---

<sup>16</sup> Friction and Wear Testing, Source Book: Selected References from ASTM Standard and ASM Handboks. 1997. P.47.

C385); las cuales se maquinaron con las medidas establecidas en la norma ASTM G83-96: 12.7 mm. (0.5 in) de diámetro y 102 mm (4 in) de longitud.

Las probetas fueron maquinadas en torno, pulidas con papel de carburo de silicio # 600; con el objetivo de obtener una superficie lisa, libre de óxidos y cualquier defecto importante superficial que pueda interferir en el ensayo. Éstas se limpiaron y se secaron con alcohol antes y después de cada prueba para así eliminar la suciedad y partículas extrañas, evitando de esta forma errores en las mediciones de pérdida de peso.

## 5.2. PUESTA A PUNTO DE LA MÁQUINA DE CILÍNDROS CRUZADOS

De acuerdo a la norma se utilizó el acero AISI – SAE 1020 como material estándar para determinar el funcionamiento de la máquina. En la tabla 3 se muestran los parámetros de prueba del tribómetro de cilindros cruzados, donde el procedimiento C fue el utilizado para desarrollar las pruebas de desgaste en los latones ya mencionados en el capítulo 5.1.

Tabla 2. Parámetros de prueba para los ensayos realizados en el tribómetro<sup>17</sup>.

Procedimiento	Carga	Revoluciones	Velocidad	Distancia Deslizada	Tiempo
	(Kg-f)		(RPM)	(mm)	(min)
A	7.19	80000	442	3191865.6	181
B	7.19	40000	442	1595932.8	90.5
C	7.19	10000	110	398982.3	91

<sup>17</sup> Báez P Sandro. Evaluación del desgaste por fricción de algunos metales ferrosos y no ferrosos, con una maquina de cilindros cruzados. Bucaramanga: UIS, 2002.

### 5.3. PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO DE DESGASTE

De acuerdo a la norma ASTM G 83-96 se utilizó el procedimiento C debido a la dureza de los materiales utilizados en este proyecto. Los pasos establecidos para realizar un ensayo de desgaste en la máquina de cilindros cruzados de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica son:

1. Limpiar las dos probetas con un solvente, para eliminar grasas y elementos extraños.
2. Pesar cada una de las probetas y registrar su peso, con una exactitud de  $\pm 0.1$  mg.
3. Determinar el procedimiento del ensayo según el material, para utilizar el juego correcto de poleas de la máquina.
4. Retirar el recolector para virutas de material.
5. Levantar el portaprobetas estático junto con el porta carga y colocar una probeta.
6. Insertar la otra probeta en la copa del eje de transmisión, ajustándola con los prisioneros respectivos. Desplazar la plataforma con la manivela hacia la izquierda, con cuidado, hasta que la probeta quede dentro del prisionero y ajustar.
7. Poner en contacto la probeta estática sobre la probeta móvil junto con la carga, procurando no golpear con fuerza las dos probetas.
8. Colocar de nuevo el recolector para virutas de material.
9. Conectar el motor para iniciar la prueba.
10. Después de terminar el ensayo, desconectar el motor.
11. Levantar el porta probetas estático y retirar la probeta.
12. Aflojar el prisionero de la copa móvil y desplazarla hacia la derecha con la manivela.

13. Aflojar el prisionero de la copa del eje de transmisión y retirar la probeta.
14. Limpiar el recolector para virutas de material.
15. Limpiar cada una de las probetas con solvente, para eliminar grasas y elementos extraños y luego registrar sus pesos.
16. Determinar el peso perdido de cada probeta.
17. Estimar la cantidad de material perdido como la suma del material perdido de cada una de las probetas.
18. Calcular el volumen de material perdido en mm<sup>3</sup>.

#### 5.4 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN

En esta investigación se utilizaron las siguientes ecuaciones para determinar el coeficiente de fricción, la velocidad de desgaste, la distancia deslizada y el volumen de material perdido, según la norma ASTM G-83 96:

- Volumen de material perdido.

$$V = \frac{\text{Pesoinicial} - \text{Pesofinal}(\text{gr})}{\text{Densidad}(\text{gr} / \text{cm}^3)} * 1000 \quad (15)$$

- Velocidad de desgaste

$$Vd = \frac{\text{Volumenperdido}}{\text{Tiempo}} \quad (16)$$

- Coeficiente de fricción

$$k = \frac{V * H_m}{P * S} \quad (17)$$

-Densidad

$$\rho = \frac{Masa1 + Masa2}{Volumen1 + volumen2} \quad (18)$$

-Distancia deslizada

$$S = 2 * \pi * r * R \quad (19)$$

V = Volumen de material perdido en mm<sup>3</sup>.

S = Distancia de deslizamiento en mm.

P = Carga en kilogramos.

H<sub>M</sub> = Dureza del material en HRB (knoop)

K = Coeficiente de fricción.

R = Número de revoluciones por minuto

r = Radio en mm.

$\rho$  = Densidad<sup>18</sup> en g/mm<sup>3</sup>

---

<sup>18</sup> Norma ASTM G-83

## **5.5. RUGOSIDAD**

Para la medición de la rugosidad, las probetas se maquinaron y se lijaron con papel de carburo de silicio número 600, posteriormente se limpiaron con alcohol antes de la prueba para eliminar partículas extrañas y posibles errores en las mediciones. Las medidas de la rugosidad fueron tomadas por medio del rugosímetro Tester T500, el cual fue facilitado por el grupo de investigación en corrosión de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica; este dispositivo muestra tres datos de rugosidad, sin embargo, para efectos del ensayo, se tomó como parámetro estándar la rugosidad media (Rz).

Ra = Rugosidad mínima.

Rz = Rugosidad media.

Rmax = Rugosidad máxima.

## **5.6. CONFIABILIDAD DE LOS RESULTADOS**

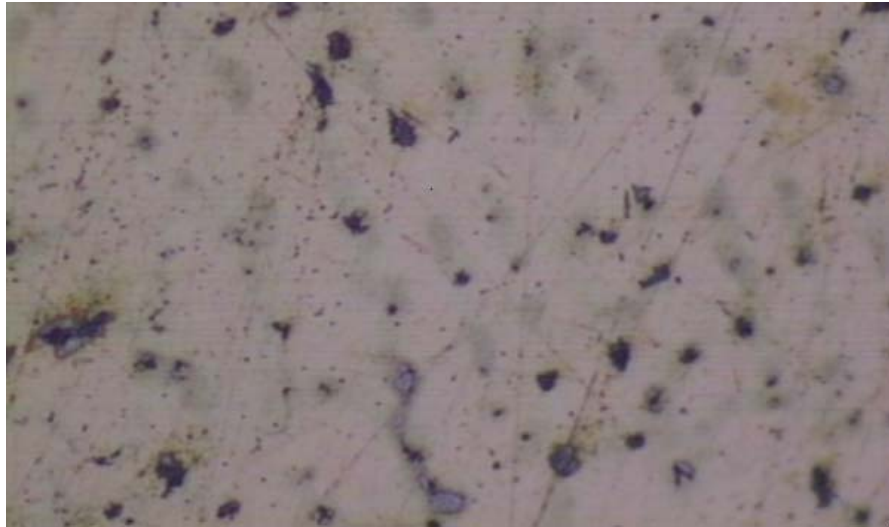
De acuerdo a la norma ASTM G83-96, la confiabilidad de los resultados en el aparato de cilindros cruzados se estableció bajo ciertos parámetros, como son:

- Para ensayos realizados en un mismo laboratorio el coeficiente de variación total, debe tener como límite máximo un 15% para ser considerado aceptable.
- Si los resultados son confrontados con otros laboratorios se permite como máximo un coeficiente de variación de 30%.

## 6. RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

En las figuras 13 y 14 se observan las micrografías de los latones ASTM B 145 y ASTM B 455 respectivamente. Hay que resaltar que a estas probetas se les hizo un pulido mecánico, pasando por papel de carburo de silicio número 80, 120,400 y 600; se limpiaron y se secaron con alcohol bajo un chorro de aire, para luego ser atacadas con cloruro férrico alcohólico.

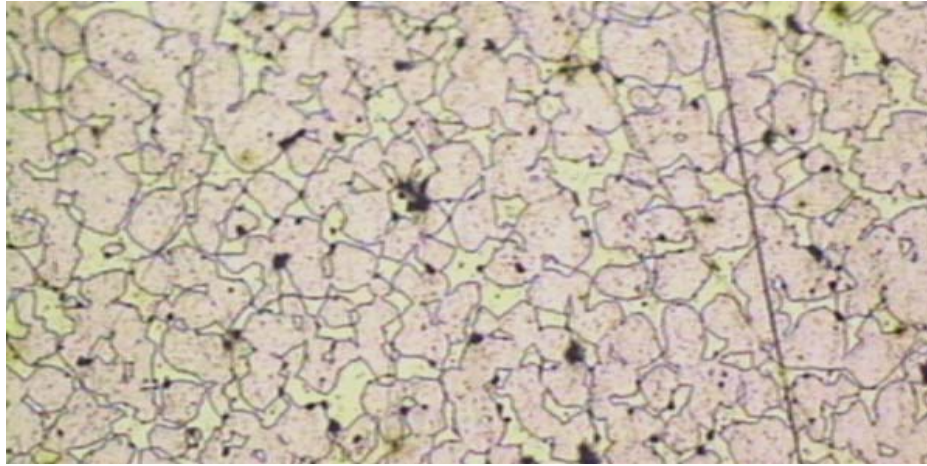
Figura 13. Micrografía del latón ASTM B 145. 500 X.



Como se puede observar en la micrografía (figura 13), y debido al porcentaje de zinc presente en este latón, se obtuvo una microestructura monofásica, compuesta de cristales de solución sólida de zinc en el cobre (fase  $\alpha$ ). Este tipo de aleaciones presenta una red cristalina cúbica centrada.

En la siguiente microestructura (figura 14) se observa una estructura bifásica de  $\alpha+\beta$ , común para este tipo de latones.

Figura 14. Micrografía del latón ASTM B 455. 200 X.



En la tabla 3 se puede apreciar la composición química aproximada de los materiales que se ensayaron en esta investigación; en el anexo A se presenta el análisis SEM-EDX para el latón ASTM B 455.

Tabla 3. Composición química de los latones ASTM B 145\*\* y ASTM B 455\* y el acero al carbono\*.

Latón	Cu %	Pb %	Zn %	Sn %	Fe %	P %	Sb %	Ni %	S %	Al %
B 145	84-86	4-6	4-6	4-6	0.3 máx.	0.05 máx.	0.25 máx.	1 máx.	0.08 máx.	0.005 máx.
B 455	60.34	2.5	37.16							
Acero AISI-SAE 1020	C	Mn	P Máx.	S Máx.	Si					
	0.18/ 0.23	0.30/ 0.60	0.04	0.05	0.20/ 0.35					

\* Compañía general de aceros (Seccional Bucaramanga)

\*\* UNALMED. (Medellín)

En la tabla 4 se pueden observar algunas de las propiedades de los materiales que fueron utilizados en los ensayos. En el anexo B se observan los valores de dureza para los 2 latones.

Tabla 4. Propiedades de los materiales utilizados en los ensayos.

Material	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	Dureza KNOOP
Acero AISI-SAE 1020	7.52	137
LATÓN ASTM B 455	8.47	133
LATÓN ASTM B 145	8.83	87*

\*Este valor de dureza se encuentra aproximado.

### 6.1. PERFILES DE DESGASTE

En general, las curvas de desgaste permiten establecer el período de incubación en el que transcurre el endurecimiento por deformación, seguido de un periodo de desgaste acelerado donde ocurren las mayores pérdidas de material y posteriormente, el desgaste catastrófico. A continuación se muestran los perfiles de desgaste de los materiales ensayados en las figuras 15 a la 18, y la figura 19 muestra el estado final de las superficies de las probetas, después de los ensayos realizados en la máquina.

Figura 15. Perfil de desgaste del acero AISI-SAE 1020, obtenido del ensayo en la máquina de cilindros cruzados.

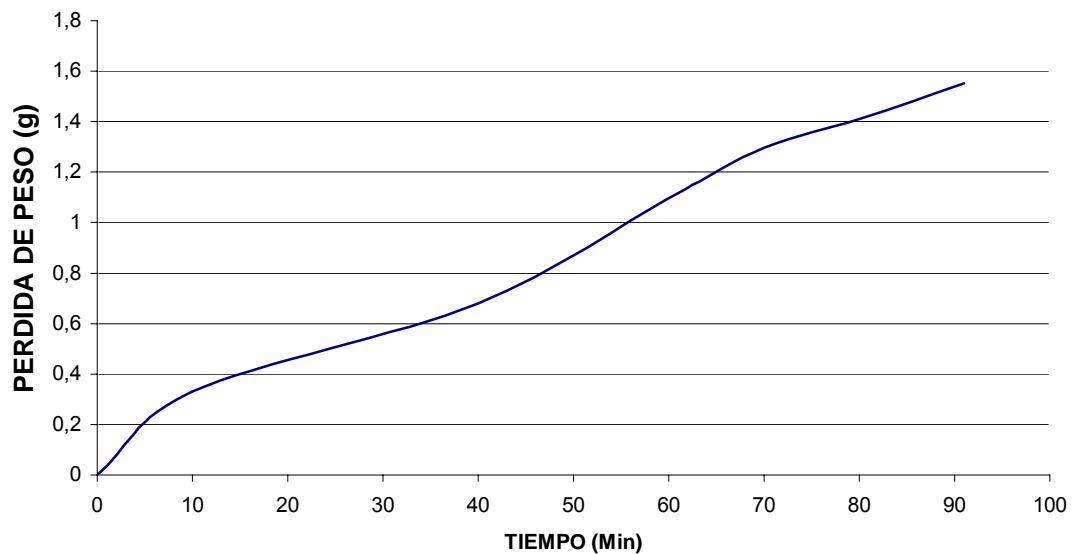


Figura 16. Perfil de desgaste del latón ASTM B 145 – 4A.

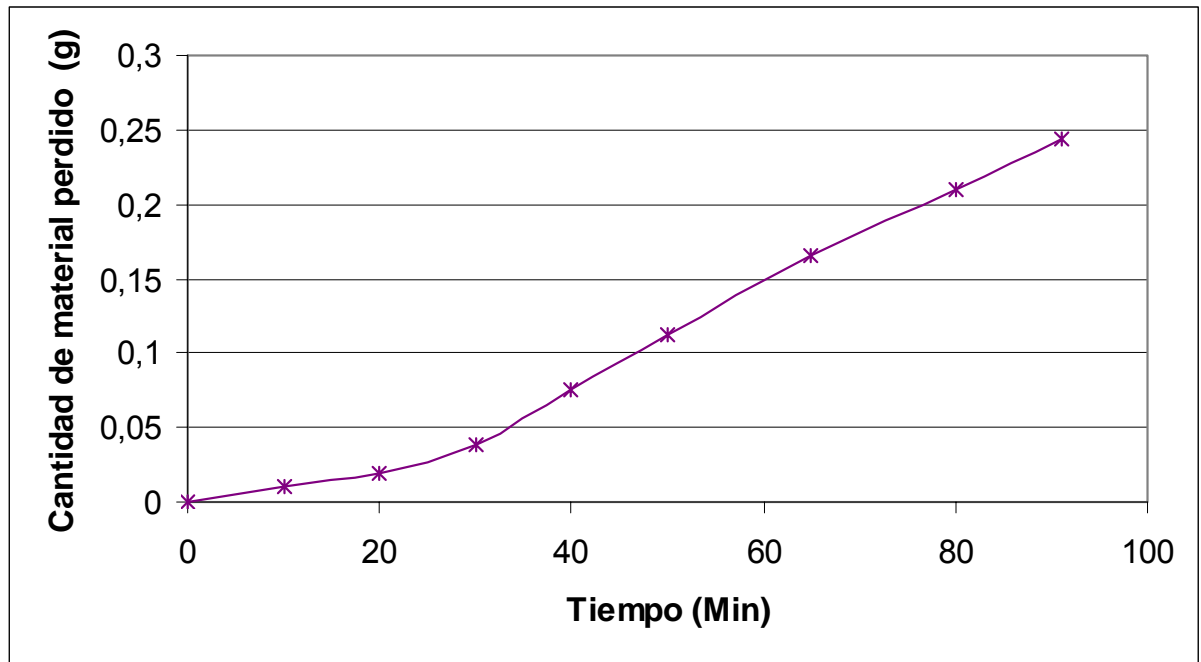


Figura 16a. Perfil de desgaste ampliado del latón ASTM B 145 – 4<sup>a</sup>, entre 0 y 50 minutos.

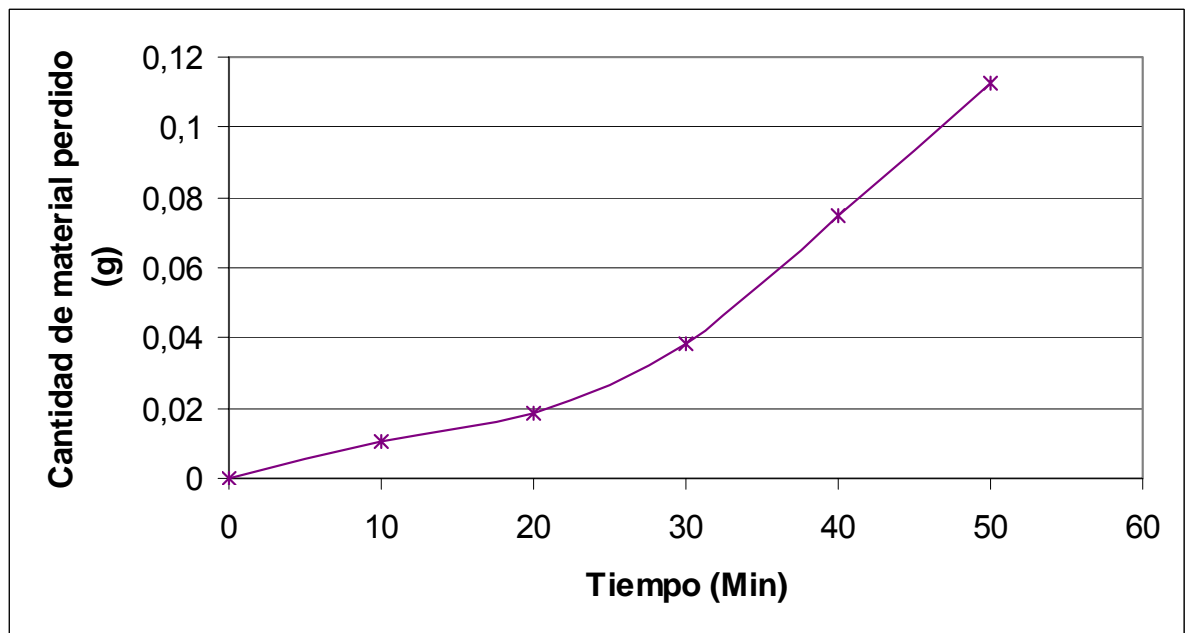


Figura 17. Perfil de desgaste del latón ASTM B 455.

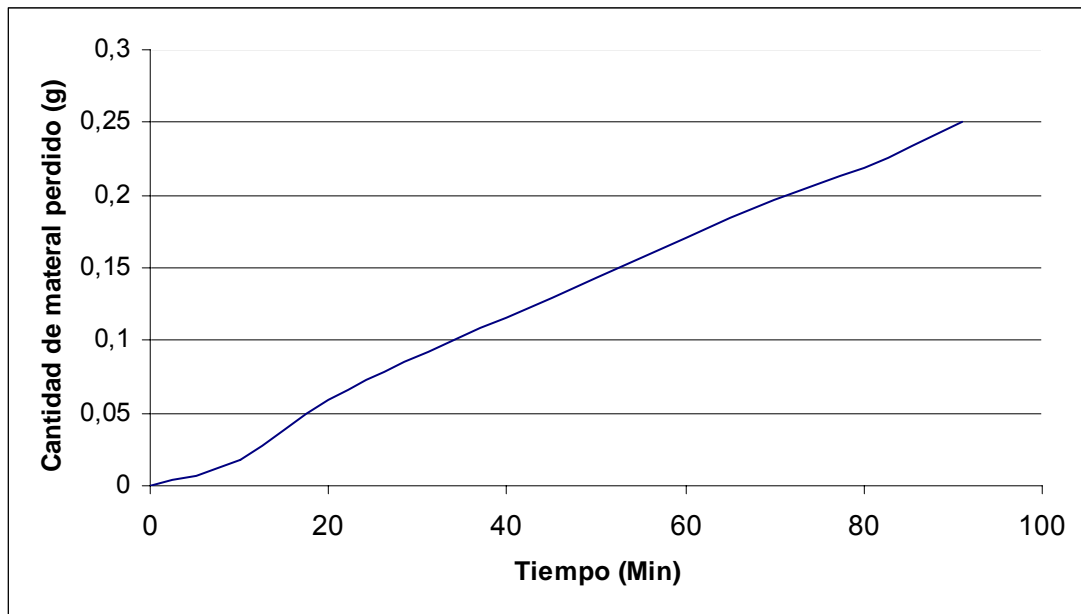


Figura 17a. Perfil de desgaste ampliado del latón ASTM B 455, entre 0 y 30 minutos.

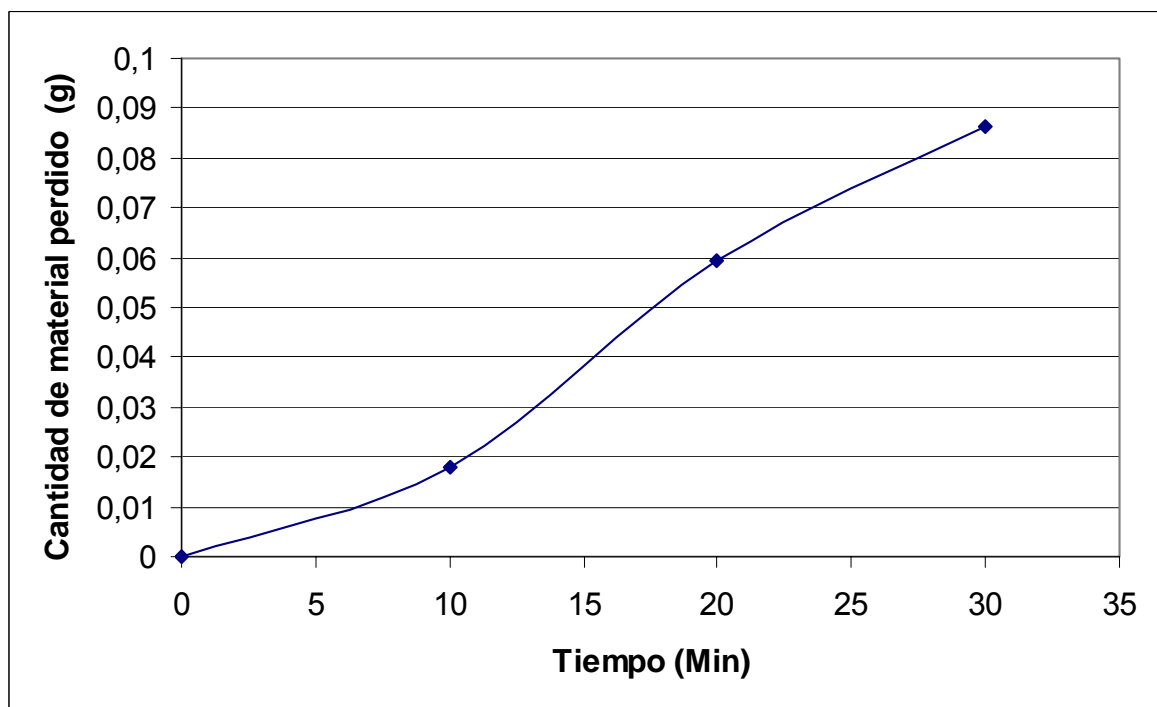


Figura 18. Perfiles de desgaste de los latones ensayados.

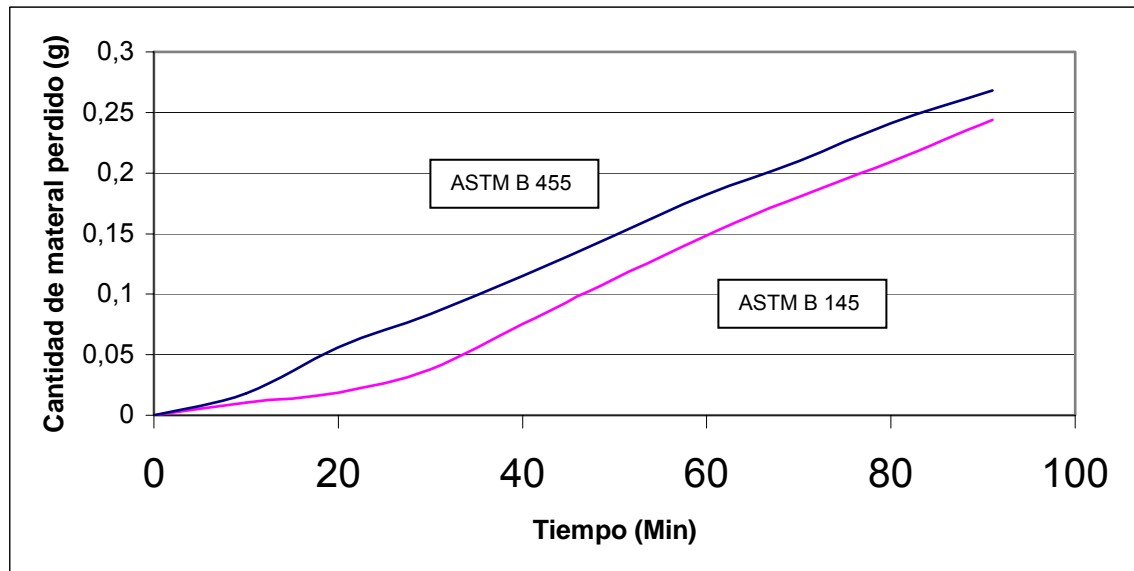


Figura 19. Estado superficial final de las probetas sometidas a desgaste.



En el anexo C se adjuntan los resultados obtenidos en el laboratorio con la máquina de cilindros cruzados, como lo estipula la norma ASTM G83-96. En este anexo se puede observar que los coeficientes de variación de los materiales ensayados no exceden del 4%. Esto indica que los resultados obtenidos en la máquina de cilindros cruzados son confiables, ya que en la norma, este coeficiente de variación no debe exceder el 15%. Además se muestran las tablas de pérdida de peso para cada uno de los ensayos. En el anexo D se presenta la dispersión de los datos para los latones en sus respectivos perfiles de desgaste.

## 6.2. COEFICIENTES DE FRICCIÓN

En la siguiente tabla se puede apreciar 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; además, se hace una comparación de los valores del coeficiente de fricción calculado con su respectivo valor teórico.

Tabla 5. Resultados obtenidos de las pruebas de desgaste para los latones a 27°C.

Material	Volumen perdido (mm <sup>3</sup> )	Velocidad de desgaste (mm <sup>3</sup> /min)	k Teórico	k Experimental*
Acero AISI-SAE 1020	324.54	3.566	7E-3	1.72E-4
Latón ASTM B 455	31.61	0.3474	6E-4	1.63E-5
Latón ASTM B 145	26.315	0.2892	—	8.86E-6

\*Estos valores están en el rango mencionado por Rabinowicz; figuras 5 y 6.

### 6.3 RUGOSIDADES

La rugosidad de un material permite conocer que tan lisa se encuentra una superficie a nivel microscópico, para así poder entender como este factor influye en el mecanismo de desgaste del material. Las tablas 6 y 7 muestran las medidas de rugosidad tomadas a los materiales ensayados. Para la medición de la rugosidad las probetas se maquinaron y se lijaron con papel de carburo de silicio número 600, posteriormente se limpiaron con alcohol y se secaron bajo un chorro de aire antes de la prueba para eliminar partículas extrañas y posibles errores en las mediciones. En el anexo E se pueden observar las rugosidades tomadas a los materiales después de ser ensayados.

Tabla 6. Rugosidad del latón ASTM B 145 antes del ensayo

PRUEBA N°	1	2	3	4	5	PROMEDIO
Ra	0.08	0.08	0.1	0.08	0.08	0.08
Rz	0.78	0.88	1.2	0.8	0.98	0.93
Rmax	1.18	1.14	2.0	1.08	1.68	1.4

Tabla 7. Rugosidad del latón ASTM B 455 antes del ensayo

PRUEBA N°	1	2	3	4	5	PROMEDIO
Ra	0.1	0.1	0.06	0.1	0.08	0.09
Rz	0.92	0.90	1.00	1.04	0.98	0.97
Rmax	1.26	1.84	1.90	1.56	1.68	1.65

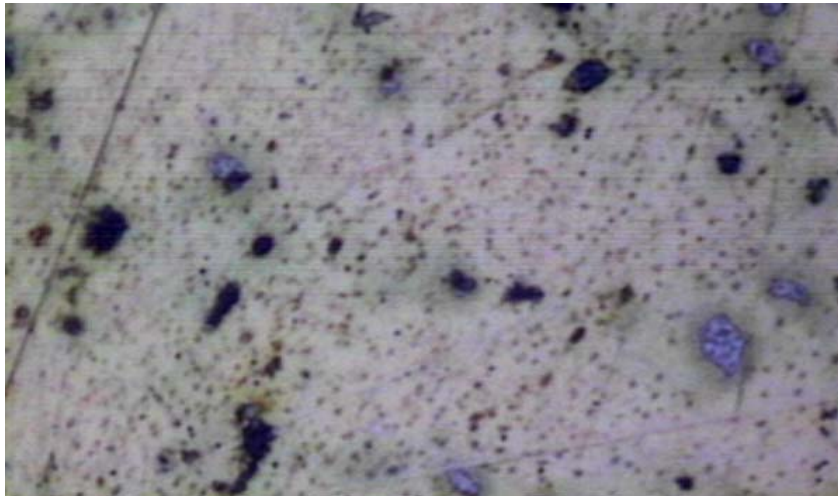
Para efecto del ensayo, se tomó como parámetro estándar la rugosidad media (Rz).

## 6.4 ANALÍISIS DE RESULTADOS

### 6.4.1 Microestructuras de los latones

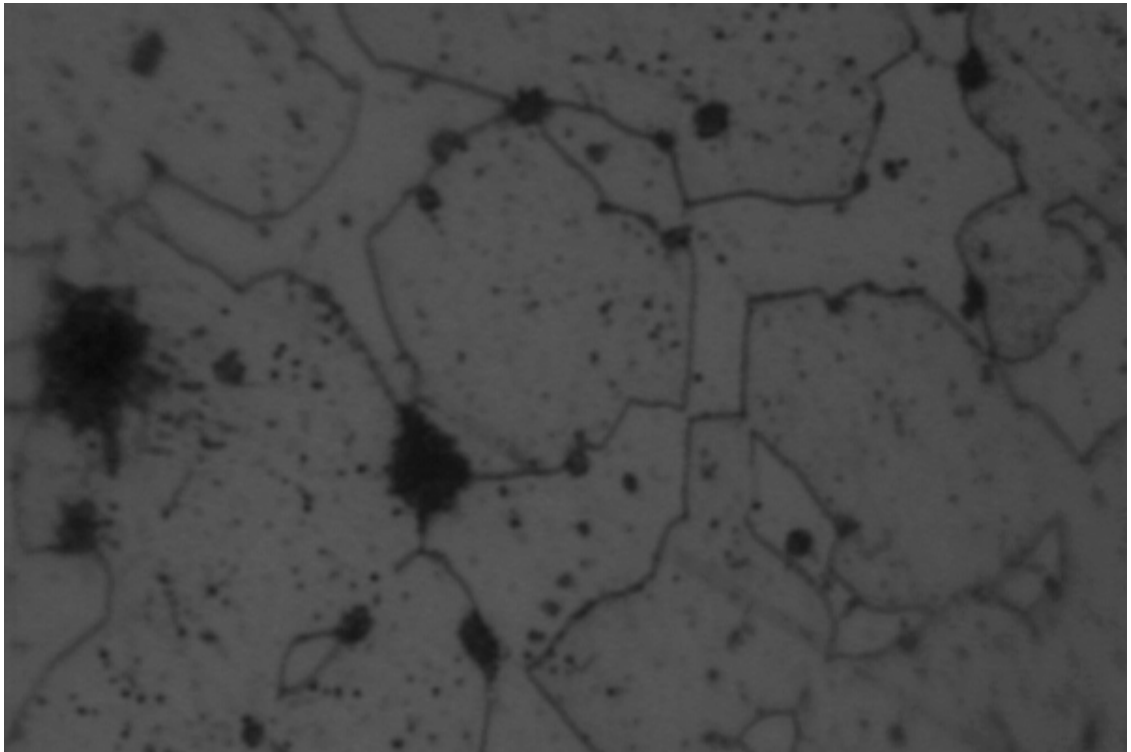
A partir de las figuras 20 y 21 se puede analizar lo siguiente:

Figura 20. Micrografía del latón ASTM B 145. 1000X



En el latón ASTM B 145 se observa una gran cantidad de plomo y algunas porosidades a simple vista. A bajos aumentos el plomo aparece oscuro, y algunas veces es difícil diferenciar entre el plomo y las porosidades. Sin embargo en las zonas en donde no se observan poros, las partículas de plomo pueden enfocarse con el resto de la estructura a mayores aumentos, apreciándose una superficie de apariencia manchada. Con el pulido final y atacando con cloruro férrico alcohólico, en la micrografía se observan inclusiones de sulfuros en gris asociado con el plomo, ambas en estado libre; las inclusiones de sulfuros tienen una superficie relativamente lisa.

Figura 21. Micrografía del latón ASTM B 455. 1000 X



En la micrografía del latón ASTM B 455 se observan porosidades y granos de forma angular con partículas de plomo elongadas. Se evidencia la presencia de plomo por su aspecto oscuro, que al igual que la anterior micrografía, podría confundirse con las porosidades, sin embargo, su matriz es mas homogénea en composición; en este latón el plomo se distribuye dentro de los granos, característica propia de estos latones.

El análisis micrográfico de los latones muestra como el trabajado mecánico y la presencia de ciertos elementos aleantes influye en la estructura, presentándose diferencias en la forma y tamaño de los granos, y produciendo la precipitación de elementos aleantes como el plomo en los límites de grano o dentro de los mismos.

De este análisis de las micrografías de los latones, se puede concluir que los elementos aleantes como el plomo influyen en el desgaste adhesivo del material, debido a que modifican la microestructura del material, ya sea que se encuentren en los límites de grano o incluidos dentro de ellos, favoreciendo un arranque mas óptimo de virutas y actuando como lubricante durante la fricción.

#### **6.4.2 Perfiles de desgaste**

Para la calibración de la máquina de cilindros cruzados se utilizó el acero AISI-SAE 1020, debido a que es un material fácil de conseguir y de trabajar, el cual permite obtener un perfil de desgaste estándar con las tres etapas del proceso de desgaste, ver figura 15. La primera etapa, que es la de asentamiento, tuvo una duración de aproximadamente los primeros 10 minutos del ensayo; la segunda etapa, la cual sigue un régimen de desgaste casi constante, estaría entre los 10 y los 50 minutos aproximadamente. De aquí en adelante, es decir, desde los 50 minutos, se observa la tercera etapa, en la cual se produce el desgaste tipo catastrófico, con una pérdida de material mayor a la de las etapas anteriores. El anterior comportamiento es similar al obtenido en el trabajo de Báez.<sup>19</sup>

En las figuras 16 y 16a se obtuvo el perfil de desgaste para el latón ASTM B 145 donde se observa que la primera etapa (etapa de asentamiento) tuvo una duración aproximada de 10 minutos; la siguiente etapa de desgaste se observó en el rango entre 10 y 30 minutos, en la cual se presentó un desgaste significativo.

---

<sup>19</sup> BAEZ P. Sandro. Evaluación Del Desgaste Por Fricción De Algunos Metales Ferrosos Y No Ferrosos, Con Una Máquina De Cilindros Cruzados. Bucaramanga: UIS, 2002.

La última etapa está comprendida desde los 30 minutos en adelante, mostrando un desgaste severo a una velocidad constante (pendiente constante).

Al analizar la pérdida de desgaste del otro latón de las figuras 17 y 17a se observó igualmente 3 etapas de desgaste, pero éstas ocurrieron a una mayor velocidad; es así como la primera etapa duró menos de 5 minutos, es decir que tuvo un periodo de incubación muy corto, de no equilibrio, concordando con lo expresado por Czichos<sup>20</sup>.

La segunda etapa del proceso tampoco resultó ser tan larga como se esperaba, duró aproximadamente 15 minutos, observándose el desgaste propiamente dicho el cual ocurrió muy rápido; ésto tal vez sucedió debido a que la capa endurecida por trabajado se eliminó muy rápido por un efecto de fatiga superficial dejando al descubierto nuevas superficies blandas, o también pudo ocurrir un reblandecimiento por trabajado, como lo afirma Sarkar<sup>21</sup>.

La tercera etapa para este material fue la de máxima duración pues se inició a los 20 minutos y presentó como era de esperarse, un comportamiento lineal, que acelera el periodo de desgaste severo. En la figura 17a se puede observar con más detalle la primera y segunda etapa, así como su duración aproximada.

En la figura 18 se comparan los materiales ensayados lo cual permite observar de una manera más clara las diferencias entre los tiempos y las

---

<sup>20</sup> Czichos, H.; "A systems analysis data sheet for friction and wear tests and an outline for simulate testing", (55th meeting of IRG-OECD at CNRS, Paris, Abril 1976), Source Book on Wear Control Technology, Rigney, D.A. y Glaeser, W.A. (Editores), American Society for Metals, E.E.U.U. (1978), pp. 22-39.

<sup>21</sup> SARCAR, A.D. Desgaste de metales. Limusa, México, 1990. pág 189.

velocidades de desgaste, así como la pérdida de material o volumen de material perdido.

Al comparar los latones ASTM B 145 y el ASTM B 455 se encontró que las velocidades de desgaste fueron diferentes hasta aproximadamente los 40 minutos así como el volumen de material perdido. De la figura 18 se puede observar que la pérdida de material de los materiales ensayados, en orden descendente fue así: latón ASTM B 455 y el latón ASTM B 145-4A, mostrando que este último es el más resistente, debido a los elementos aleantes que contiene, como el plomo que tiene un efecto lubricante el cual disminuye la fricción y el desgaste; el latón ASTM B 455 también mostró un desgaste menor comparado con el acero al carbono, aunque contenía plomo en su composición, estaba en menor cantidad que en el latón ASTM B 145-4A.

En el proceso de la eliminación de material del latón sobre latón puede ocurrir un proceso de soldadura en frío, es decir, que a medida que la probeta se desliza, aparece un fenómeno de adherencia-deslizamiento, el cual puede producir una deformación de la subsuperficie de las probetas, lo que causa la formación de una capa superficial dura que es capaz de producir abrasión en los latones cuando se desprende debido al proceso de desgaste mejorado por la fatiga del material superficial bajo carga y fricción.

Cabe anotar que estas superficies se endurecen aún bajo cargas pequeñas y las medidas de microdureza obtenidas de la sección transversal muestran un endurecimiento en la subsuperficie, como se comprueba en esta investigación; ver anexo F.

Por último, aunque los materiales presentan 3 zonas definidas de desgaste, éstas son muy diferentes a las que se observan en los materiales ferrosos, debido al comportamiento de su estructura y elementos aleantes bajo carga y

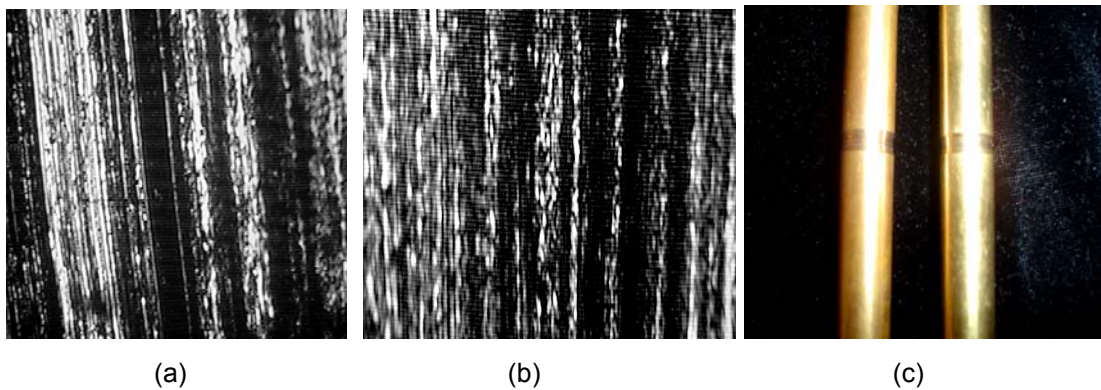
desgaste adhesivo que hacen impredecible la formación y duración de las 2 primeras etapas del perfil de desgaste. La tercera etapa, para ambos materiales, no muestra un desgaste catastrófico, sino que es un deterioro a una velocidad de desgaste constante.

En la figura 19 se observan las probetas con las respectivas huellas producto del desgaste al que fueron sometidas. El acero AISI-SAE 1020 presentó la huella mas grande ya que exhibió un mayor desgaste, debido a que es un material relativamente duro (69 HRB), y por lo tanto los puntos de contacto entre las asperezas de las superficies, debido a la fricción se hacen mas fuertes formando especies de puntos de soldadura microscópicos, que cuando se produce un rompimiento de estas adhesiones, conllevan al arranque o desprendimiento del metal; esto también ocurre, pero en un menor grado, con los latones pues su dureza es menor y las irregularidades son mas elásticas y dúctiles, que hacen que el material desprendido sea mínimo, sumándosele al hecho que los latones ensayados poseen algunos elementos aleantes, como el plomo, que tienen un efecto lubricante.

Relacionándolo con respecto a la microestructura se puede concluir que el plomo influye en el desgaste de este material debido a que éste se segrega en los intersticios del grano y/o dentro de él como partículas discretas, dependiendo de la distribución de las fases, propiedad que se aprovecha para que, añadiéndolo en proporciones adecuadas, actúe como rompevirutas durante el maquinado o fuerte rozamiento; además, la presencia de hierro favorece este efecto.

En la figura 22 se observan las huellas de los latones los cuales son muy parecidas, esto se debe a que además de la ductilidad de los latones, existe la presencia de plomo que actúa como lubricante evitando o reduciendo que se produzca un excesivo número de soldaduras (puntos de contacto) en las irregularidades del material.

Figura 22. Huella de los latones ASTM B 455 y ASTM B145



(a) Huella del latón ASTM B 455, 63X. (b) Huella del latón ASTM B 145, 63X. (c) Huella sobre las probetas de latón ASTM B 145 Y ASTM B 455, 1X.

Además, se puede observar como las capas superficiales fueron fuertemente afectadas, debido a que las condiciones del ensayo se establecieron para que estuvieran dentro de un régimen de desgaste severo; la formación de surcos, particularmente pronunciados se deben a las altas presiones de contacto, éstas ocurrieron sobre la superficie de contacto, siendo una muestra de desgaste abrasivo-adhesivo con alta deformación plástica.

En la figura 22a y 22b se puede apreciar la superficie de las probetas después de ser sometidas a desgaste; en éstas se observa la influencia de las cantidades de los elementos aleantes como el plomo y el estaño. Es posible diferenciar como el latón ASTM B 145 presenta ondulaciones o surcos más finos correspondientes a un desgaste menor por una mayor cantidad de elementos aleantes; del mismo modo se puede observar como el latón ASTM B 455 presenta unas ondulaciones o surcos más gruesos, los cuales corresponden a un proceso de desgaste mayor. Obviamente esto también se relaciona con la dureza antes y después de los ensayos, donde el latón con más dureza se desgasta más debido a que es menos dúctil con respecto al que tiene menos dureza.

En conclusión, a mayor dureza mayor desgaste debido al desgarre y desprendimiento ocasionado por el endurecimiento de la superficie del material, por lo que se incrementa el desgaste debido al tercer cuerpo duro entre ambos materiales.

Un factor muy importante e influyente a la hora de comprender el mecanismo de desgaste es el saber que nunca se encontrará una superficie totalmente lisa o plana a nivel microscópico. De acuerdo a esto, se sabe que toda superficie presenta ciertas deformaciones como ondulaciones en forma de colinas y valles, las cuales deben ser cuantificadas por medio de su rugosidad superficial; la norma ASTM G83-96, establece que un promedio aritmético de  $1.25\mu\text{m}$  o menor a éste es aceptable, lo cual se cumplió para todos los materiales utilizados cuya rugosidad se obtuvo con el rugosímetro (tester T500), antes y después de los ensayos. Las medidas de rugosidad registradas después de los ensayos fueron del orden de  $7\mu\text{m}$ , lo cual indica que la superficie final aumentó su rugosidad, comparada con los valores iniciales ( $< 1.25\mu\text{m}$ ), dando una idea del desgaste acelerado que se presentó en estos latones.

Los coeficientes de fricción obtenidos en los ensayos, se encuentran en los rangos de  $8.86\text{E}-6$  y  $1.63\text{E}-5$ , los cuales están en el mismo orden de magnitud mencionados por Rabinowicz<sup>22</sup>, por lo tanto, dan cierta confiabilidad a los resultados.

Se comparó el coeficiente de fricción del latón ASTM B 455 con un valor teórico y con el valor hallado por Báez<sup>23</sup> en su trabajo, donde se puede

---

<sup>22</sup> Rabinowicz, E.; Wear Coefficients – Metals; Wear Control Handbook; Ed. M.B. Peterson, ASME, New York, (1980); pp 475 - 506

<sup>23</sup> BAEZ P. Sandro. Evaluación Del Desgaste Por Fricción De Algunos Metales Ferrosos Y No Ferrosos, Con Una Máquina De Cilindros Cruzados. Bucaramanga: UIS, 2002.

observar que los valores obtenidos no son del mismo orden de magnitud, pero que se consideran representativos; sin embargo, para el latón ASTM B 145 solo fue posible hacer una comparación con el obtenido por Rabinowicz, debido a que no existe disponibilidad de este valor teórico en la literatura consultada, pero aún así se le considera un dato confiable.

Por otro lado, es necesario aclarar que en la literatura estos valores no están en el rango sin lubricación, sino por el contrario están en el rango de una buena lubricación y comienzos de una excelente lubricación, esto se debe a la influencia de los elementos aleantes, en especial el plomo, que es el elemento que más influye en estos latones y es el que ubica a estos materiales en la región de metales compatibles con excelente lubricación, para un desgaste de tipo adhesivo; pero, sí se les clasificará como metales incompatibles, aún así están en una región con buena lubricación, esto para ambos materiales, de acuerdo a los coeficientes calculados y clasificados por Rabinowicz.

## CONCLUSIONES

Se determinó la cantidad de material perdido de los latones ASTM B 145 y ASTM B 455 obteniéndose resultados de 3.26% para el latón ASTM B 455 y 2.25% para el latón ASTM B 145 de los parámetros de variación, los cuáles son confiables de acuerdo a los términos indicados por la norma ASTM G83-96.

Se calcularon los coeficientes de fricción del latón ASTM B 455 y latón ASTM B 145 obteniendo resultados confiables, así mismo se elaboró para cada material, un perfil de desgaste (desgaste en gramos vs tiempo en minutos), de los cuales se concluyó que de los dos latones, el latón ASTM B 455 presentó la menor resistencia al desgaste y el latón ASTM B 145 fue el que ofreció la mayor resistencia al desgaste, aunque cabe anotar que se deterioran a una velocidad de desgaste constante en su etapa crítica.

Se midieron las rugosidades de los latones ensayados, obteniéndose la menor rugosidad en el latón ASTM B 145 y una mayor para el latón ASTM B 455 que al relacionarlos con el desgaste obtenido, confirma que para materiales más rugosos el desgaste será mayor que para materiales menos rugosos en las etapas iniciales del proceso, sin embargo es de notar que la rugosidad final en ambos latones fue casi idéntica, del orden de  $7\mu\text{m}$ .

## RECOMENDACIONES

Programar un mantenimiento preventivo de la máquina de cilindros cruzados, mínimo una vez por semestre, pero si ésta llega a utilizarse con cierta regularidad, se debe realizar las veces que sean necesarias.

Aunque la máquina de cilindros cruzados ofrece gran confiabilidad en los coeficientes de variación, es preciso tratar de adecuar en lo posible dispositivos que permitan mejorar su funcionamiento y su precisión, tales como: montar un motor con un regulador de velocidad electrónico, instalar un temporizador electrónico automático, acondicionar un sistema de aplicación de carga hidráulico o neumático que se pueda regular de acuerdo a la necesidad establecida.

## BIBLIOGRAFIA

<http://www.geocities.com/elecodes/intro.htm>

[http://www.ingelub.com.co/SEMINARIO\\_LIMA.htm](http://www.ingelub.com.co/SEMINARIO_LIMA.htm)

[http://www.ingelub.com.co/REVISTA\\_2.asp](http://www.ingelub.com.co/REVISTA_2.asp)

A.S.M. Committee on Wear Resistance; "The Selection of Steel for Wear Resistance", Metals Handbook, V. 1, Properties and Selection, 8va Ed., A.S.M. (1961), pp. 244-257.

A.S.M. Committee on Sliding Bearings; "Bearing material structures", Metals Handbook, V. 3, 9na Edición, A.S.M. (1980), pp. 802-822.

BAEZ P. Sandro. Evaluación Del Desgaste Por Fricción De Algunos Metales Ferrosos Y No Ferrosos, Con Una Máquina De Cilindros Cruzados. Bucaramanga: UIS, 2002.

MARTINEZ PEREZ, Francisco. La tribología, ciencia y técnica para el mantenimiento. Limusa, México, 1997. pág. 31.

HUTCHINGS, Ian. M. Tribology: friction and wear of engineering materials. Great Britain, 1992. pág 81

SARKAR, A.D. Desgaste de metales. Limusa, México, 1990. Pág. 27.

MILLER L, Engineering Dimensional Metrology, 1962

Annotated metallographic specimens. Standard series. Set 3,7.  
Metallurgical services laboratories Ltd.

Annotated metallographic specimens. Standard series. Set 7.  
Metallurgical services laboratories Ltd.

CZICHOS, H.; "A systems analysis data sheet for friction and wear tests and an outline for simulative testing", (5th meeting of IRG-OECD at CNRS, Paris, Abril 1976), Source Book on Wear Control Technology, Rigney, D.A. y Glaeser, W.A. (Editores), American Society for Metals, E.E.U.U. (1978), pp. 22-39.

EYRE, T.S.; "Wear characteristics of metals", (Tribology International, Oct. 1976), Source Book on Wear Control Technology, Rigney, D.A. y Glaeser, W.A. (Editores), American Society for Metals, E.E.U.U. (1978), pp. 1-10.

RABINOWICZ, E.; "The wear coefficient - Magnitude, Scatter, Uses"; Journal of Lubrication Technology, Transactions of the ASME, V. 103, N° 2, (1981), pp. 188-194.

Por RABINOWICZ, E.; Wear Coeficientes - Metals; Wear Control Handbook; Ed. M.B. Peterson, ASME, New York, [1980]; pp. 475-506

NORMA ASTM G-83 de 1996. Método estándar para un ensayo de desgaste con un aparato de cilindros cruzados.

NORMA ASTM G-40. Terminología estándar relacionada con el desgaste y la erosión.

NORMA ASTM B 455 – 01. Especificación estándar para la aleación de cobre – zinc – plomo (latón al plomo) extruida.

NORMA ASTM B 145 – 4A. Especificación estándar para la aleación de cobre – estaño – plomo – zinc (85-5-5-5).

Carta de Especificaciones Técnicas del Acero AISI-SAE 1020. Compañía General de Aceros.

LAJTIN. Yu. M. Metalografía y tratamiento térmico de los metales. Rusia, Mir. 1973. p 412.

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

KATO Koji.; “Wear in relation to friction — a review”, Laboratory of Tribology, School of Mechanical Engineering, Tohoku University, Sendai 980-8579, Japan. 2000 Elsevier Science S.A; pp 151-157

JAHANMIR. S. “Phase transformation of  $\alpha$ -  $\beta$  brass caused by friction”.Sibley School of Mechanical and Aerospace Engineering, Cornell University, Ithaca,N.Y. 14853 (U.S.A ) (Received April 18, 1979)

GOTO and M. Ashida. “Friction and wear brass during fretting under various environmental conditions H”. August 88 Vol 21 No 4.

BLAU, PETER J. “Fyfty years of research on the wear of metals”. Tribology International. vol. 30, No. 5, pp. 321-331.1997

TEISUKE Sato, Yoshihiro Tada, Masanori Ozaki, Kyin Hoke, Tatsuo Besshi. ”A crossed-cylinders testing for evaluation of wear and tribological properties of coated tools”. ELSEVIER Wear 178 (1994) 95-100.Faculty of Mechanical Engineering Tokwhima University 2-1 Minamijosanjima-cho, Tokushima, 770, Japan. Tokushima Prefectuml Industrial Technology Center, II-2 Saika-cho, Tokushima, 770, Japan. Received 24 February 1994; accepted 7 July 1994.

ANEXOS

## ANEXO A. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL LATÓN ASTM B 455.

UIS

09/12/2004 11:31:47 p.m.

Project: UIS  
Owner: Administrator  
Site: Site of Interest 1

Sample: ASTM B 455  
Type: Default  
ID:

Spectrum Label: Spectrum 2

Livetime 100.0 s

Acquisition geometry ( degrees ):

Tilt = 0.0

Azimuth = 0.0

Elevation = 35.0

Accelerating voltage = 20.00 kV

Total spectrum counts = 121750

Sample data :	Energy (eV)	Resn. (eV)	Area
Strobe :	.0	50.19	398276
Optimization data : Cobalt K series			
Strobe :	Energy (eV)	Resn. (eV)	Area
Optimization element :	-2.5	50.70	480093
	6922.4	141.22	38045

Sample is unpolished X-ray corrections may be approximate.  
Sample is uncoated

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 0.255, 0.515 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 2

Standard :

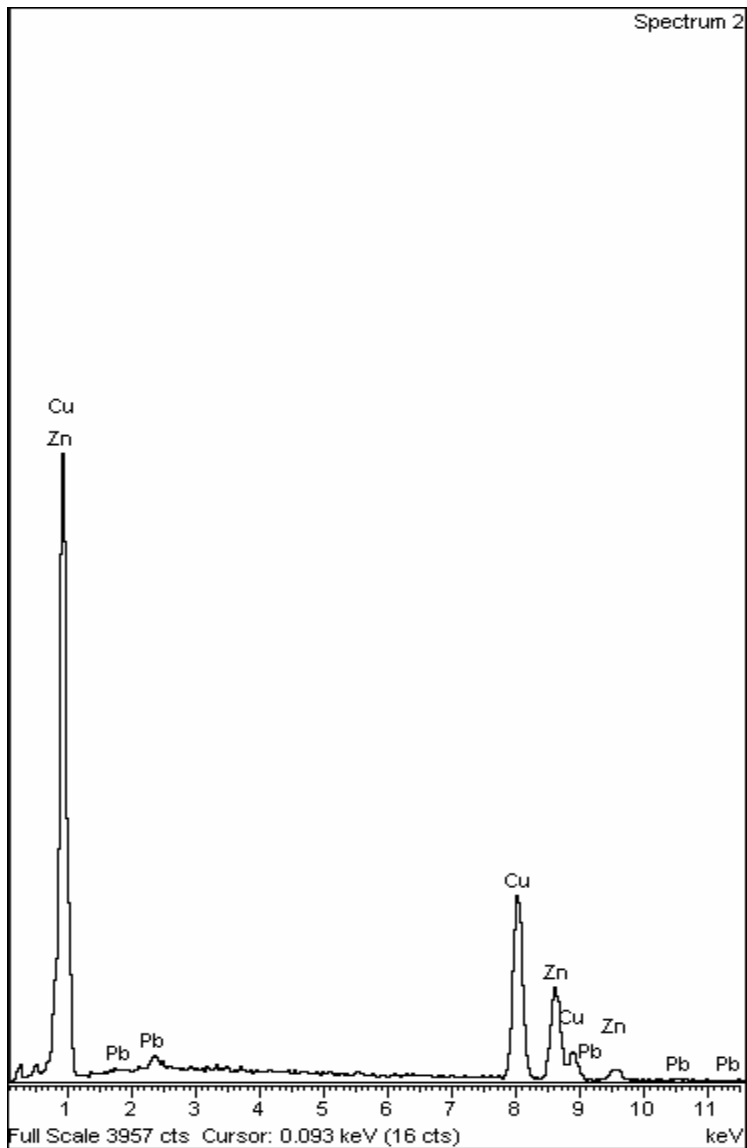
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM

Zn Zn 1-Jun-1999 12:00 AM

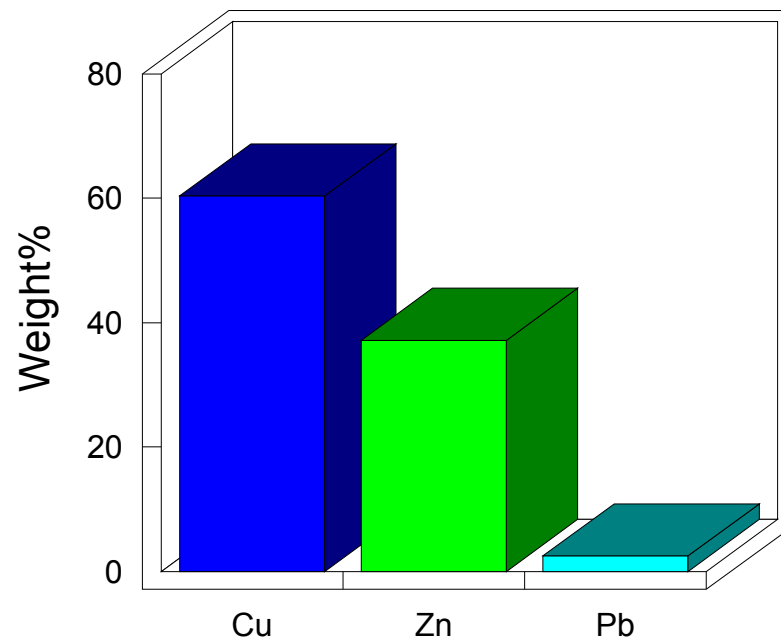
Pb PbF2 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	App Conc.	Intensity Corr.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
Cu K	55.74	1.0023	60.34	0.74	62.06
Zn K	34.45	1.0060	37.16	0.70	37.15
Pb M	1.56	0.6744	2.50	0.53	0.79
Totals			100.00		





### Quantitative results



ASTM B 455



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

Los valores de dureza calculados pertenecen a la escala de dureza HRB.

<b>Latón ASTM B 145</b>	
Valores obtenidos con el probador de durezas WILSON	
Valores Di →	22, 21, 18, 21, 21, 21, 22, 21, 21, 22, 19, 21, 21, 21, 19, 21, 21, 21, 21, 22.
Media $\overline{DP}$ →	≈20.85 HRB
Incertidumbre IV →	$\frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (D_i - \overline{DP})^2} = \frac{1}{\sqrt{20}} \sqrt{\frac{1}{19} (20.55)} \approx 0.23$

Los valores de dureza calculados pertenecen a la escala de dureza HRF.

<b>Latón ASTM B 455</b>	
Valores obtenidos con el probador de durezas WILSON	
Valores Di →	95, 95, 95, 96, 96, 95, 95, 96, 95, 96, 96, 96, 96, 95, 95, 96, 95, 95, 95, 95.
Media $\overline{DP}$ →	≈95.4 HRF ≈ 67 HRB
Incertidumbre IV →	$\frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (D_i - \overline{DP})^2} = \frac{1}{\sqrt{20}} \sqrt{\frac{1}{19} (4.8)} \approx 0.11$

### Anexo C. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS SEGÚN LA NORMA ASTM G-83 96

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS			
TIPO DE MOVIMIENTO	DESLIZAMIENTO SIMPLE			
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN			
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	<b>LATÓN 60-40 ASTM B 455</b>			
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	0,00148	4	0,26144	0,26292
2	0,00175	4	0,26648	0,26823
3	0,01174	4	0,251	0,26274
4	0,01167	4	0,27088	0,28255
5	0,00853	4	0,25372	0,26225
	R = 0,01026		R = 0,01988	R = 0,0203
	1/d <sub>2</sub> = 0,4299		1/d <sub>2</sub> = 0,4299	1/d <sub>2</sub> = 0,4299
	s = 0,00441		s = 0,00855	s = 0,00873
	$\bar{x}$ = 0,00703		$\bar{x}$ = 0,26070	$\bar{x}$ = 0,26774
	v = 62,70648%		v = 3,27821%	v = 3,25952%

TIPO DE APARATO	CILINDROS CRUZADOS			
TIPO DE MOVIMIENTO	DESLIZAMIENTO SIMPLE			
TIPO DE LUBRICACIÓN	SIN LUBRICACIÓN			
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	<b>LATÓN 85-5-5-5 ASTM B 145</b>			
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	0,01152	4	0,22137	0,23289
2	0,00485	4	0,23883	0,24368
3	0,00502	4	0,22537	0,23039
4	0,00385	4	0,21863	0,22248
	R = 0,00767		R = 0,01746	R = 0,0203
	1/d <sub>2</sub> = 0,4857		1/d <sub>2</sub> = 0,4857	1/d <sub>2</sub> = 0,4857
	s = 0,00373		s = 0,00848	s = 0,00524
	$\bar{x}$ = 0,00631		$\bar{x}$ = 0,22605	$\bar{x}$ = 0,23236
	v = 59.03834%		v = 3,75152%	v = 2.25542%

# REPORTE DE LOS DATOS DE PÉRDIDA DE PESO DURANTE LOS ENSAYOS

## PROCEDIMIENTO C

### APLICADO AL LATÓN ASTM B145

<b>Time</b>	<b>Probeta Estática gr</b>	<b>Probeta Giratoria gr</b>	<b>Total gr</b>	<b>Peso Perdido gr</b>
0	113,33661	114,33105	227,66766	0
10	113,33604	114,33096	227,667	0,00066
20	113,33556	114,3305	227,66606	0,0016
30	113,33423	114,30479	227,63902	0,02864
40	113,33348	114,26224	227,59572	0,07194
50	113,3324	114,22894	227,56134	0,10632
60	113,33041	114,203	227,53341	0,13425
70	113,32769	114,17928	227,50697	0,16069
80	113,3265	114,16045	227,48695	0,18071
91	113,32509	114,13286	227,45795	0,20971

<b>Time</b>	<b>Probeta Estática gr</b>	<b>Probeta Giratoria gr</b>	<b>Total gr</b>	<b>Peso Perdido gr</b>
0	113,32509	114,9052	228,23029	0
10	113,32495	114,90511	228,23006	0,00023
20	113,32482	114,90297	228,22779	0,0025
30	113,32435	114,86925	228,1936	0,03669
40	113,324	114,83261	228,15661	0,07368
50	113,32378	114,78465	228,10843	0,12186
65	113,3223	114,74816	228,07046	0,15983
80	113,32128	114,70733	228,02861	0,20168
91	113,32024	114,66637	227,98661	0,24368

**PROCEDIMIENTO C**  
**APLICADO AL LATÓN ASTM B 145**

<b>Time</b>	<b>Probeta Estática gr</b>	<b>Probeta Giratoria gr</b>	<b>Total gr</b>	<b>Peso Perdido gr</b>
0	113,32094	114,71648	228,03742	0
30	113,32011	114,68037	228,00048	0,03694
60	113,31814	114,58085	227,89899	0,13843
91	113,31592	114,49111	227,80703	0,23039

<b>Time</b>	<b>Probeta Estática gr</b>	<b>Probeta Giratoria gr</b>	<b>Total gr</b>	<b>Peso Perdido gr</b>
0	113,31592	113,92737	227,24329	0
30	113,31517	113,89204	227,20721	0,03608
60	113,31842	113,78752	227,10594	0,13735
91	113,31207	113,70874	227,02081	0,22248

**PROCEDIMIENTO C**  
**APLICADO AL LATÓN ASTM B 455**

<b>Time</b>	<b>Probeta Estática gr</b>	<b>Probeta Giratoria gr</b>	<b>Total gr</b>	<b>Peso Perdido gr</b>
0	103,38123	103,57199	206,95322	0
10	103,38104	103,5548	206,93584	0,01738
20	103,3808	103,5152	206,896	0,05722
30	103,3807	103,48865	206,86935	0,08387
40	103,38052	103,45696	206,83748	0,11574
50	103,38044	103,4262	206,80664	0,14658
60	103,38029	103,39505	206,77534	0,17788
70	103,37995	103,36671	206,74666	0,20656
80	103,3799	103,34266	206,72256	0,23066
91	103,37975	103,31055	206,6903	0,26292

<b>Time</b>	<b>Probeta Estática gr</b>	<b>Probeta Giratoria gr</b>	<b>Total gr</b>	<b>Peso Perdido gr</b>
0	103,37975	103,51609	206,89584	0
10	103,3795	103,49799	206,87749	0,01835
20	103,37938	103,4601	206,83948	0,05636
30	103,37903	103,433	206,81203	0,08381
40	103,37899	103,40153	206,78052	0,11532
50	103,37885	103,3683	206,74715	0,14869
60	103,37865	103,33523	206,71388	0,18196
70	103,37835	103,308	206,68635	0,20949
80	103,37813	103,27647	206,6546	0,24124
91	103,378	103,24961	206,62761	0,26823

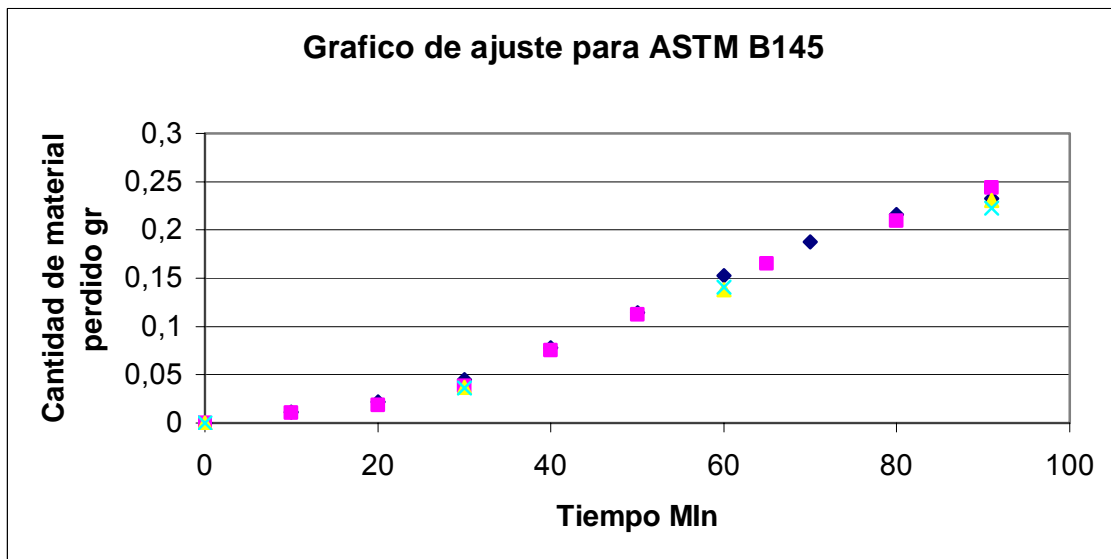
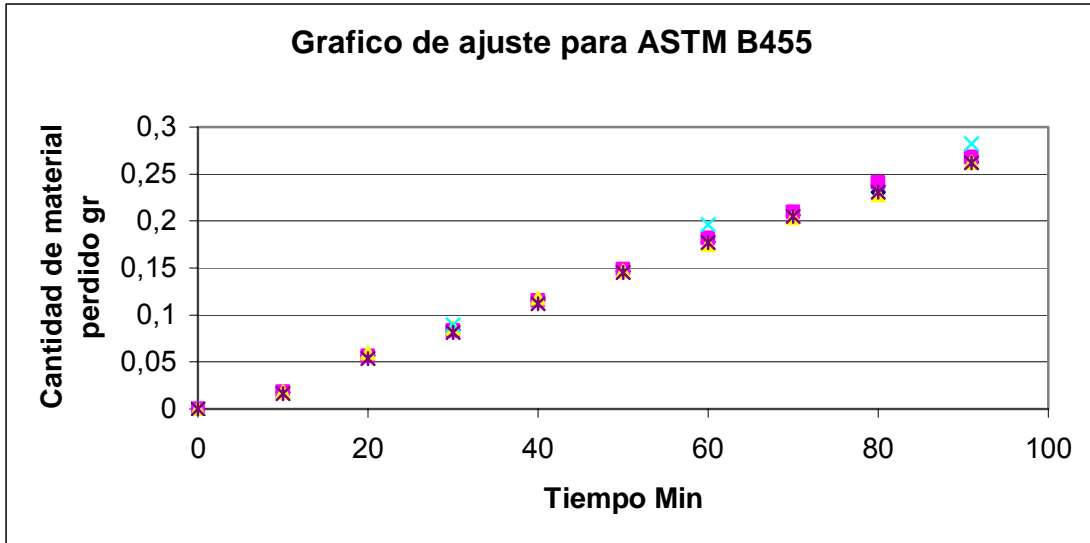
**PROCEDIMIENTO C**  
**APLICADO A LAS PROBETAS DEL LATÓN ASTM B 455**

<b>Time</b>	<b>Probeta Estática gr</b>	<b>Probeta Giratoria gr</b>	<b>Total gr</b>	<b>Peso Perdido gr</b>
0	103,378	107,68864	211,06664	0
10	103,37781	107,67067	211,04848	0,01816
20	103,37704	107,63002	211,00706	0,05958
30	103,3766	107,60364	210,98024	0,0864
40	103,37563	107,57279	210,94842	0,11822
50	103,37437	107,54599	210,92036	0,14628
60	103,37364	107,51777	210,89141	0,17523
70	103,37109	107,4918	210,86289	0,20375
80	103,36871	107,47021	210,83892	0,22772
91	103,36626	107,43764	210,8039	0,26274

<b>Time</b>	<b>Probeta Estática gr</b>	<b>Probeta Giratoria gr</b>	<b>Total gr</b>	<b>Peso Perdido gr</b>
0	103,36626	106,2277	209,59396	0
30	103,36586	106,1384	209,50426	0,0897
60	103,361	106,0368	209,3978	0,19616
91	103,35459	105,95682	209,31141	0,28255

<b>Time</b>	<b>Probeta Estática gr</b>	<b>Probeta Giratoria gr</b>	<b>Total gr</b>	<b>Peso Perdido gr</b>
0	103,35458	107,43728	210,79186	0
10	103,35432	107,42138	210,7757	0,01616
20	103,35421	107,384	210,73821	0,05365
30	103,35398	107,35646	210,71044	0,08142
40	103,35337	107,32628	210,67965	0,11221
50	103,35169	107,29508	210,64677	0,14509
60	103,34903	107,26538	210,61441	0,17745
70	103,34824	107,23857	210,58681	0,20505
80	103,34645	107,21495	210,5614	0,23046
91	103,34605	107,18356	210,52961	0,26225

## ANEXO D. REPORTE DE LA VARIACION DE LOS PERFILES DE DESGASTE



## ANEXO E. REPORTE DE LAS MEDIDAS DE RUGOSIDAD.

Estos datos fueron tomados después de los ensayos, sobre las huellas de desgaste, con el rugosímetro Tester T 500.

Rugosidad del latón ASTM B 145

PROBETA #5	1	2	3	4	5	6	7	8	PROMEDIO
Ra	2.1	1.7	1.2	1.6	1.2	2	1.6	1.7	1.6375
Rmax	19	15	10.2	13.4	13.1	13.5	15.8	13	14.125
Rz	9.6	8.4	5.8	6.6	5.7	8.3	8	6.4	7.35

PROBETA #2	1	2	3	4	5	6	7	8	PROMEDIO
Ra	1.1	1.4	1.4	1.6	1.3	1.3	1.4	1.3	1.35
Rmax	21.6	22	11.2	13.3	11.2	12.8	12.2	12.2	14.5625
Rz	6.9	10.2	5.2	7.4	6.2	5.9	6.9	5.7	6.8

PROBETA #4	1	2	3	4	5	6	7	8	PROMEDIO
Ra	1.5	1.6	1.1	1	1.6	1.9	1.2	1.8	1.4625
Rmax	12.4	14.1	12.9	11	13.3	20.4	9.6	12.3	13.25
Rz	8.7	7.7	4.7	6.4	7.4	8.6	4.4	7.9	6.975

Rz promedio fue de 7.042

Rugosidad del latón ASTM B 455

PROBETA L2-6	1	2	3	4	5	6	7	8	PROMEDIO
Ra	1.5	1.9	1.8	1.5	1.5	1.8	2	1.7	1.7125
Rmax	14.5	16.5	20.8	15.8	13.3	14.1	20.4	18.6	16.75
Rz	7.9	8.2	8.5	7.6	7.7	8.8	12.4	8.3	8.675

PROBETA L2-5	1	2	3	4	5	6	7	8	PROMEDIO
Ra	1.2	1.6	1.4	1.6	1.4	1.2	1.8	1.5	1.4625
Rmax	11	12.1	11.4	12.6	11.2	10.7	14.6	12.1	11.9625
Rz	5.5	6.8	5.9	7.1	5.9	5.4	8.3	6.6	6.4375

PROBETA L2	1	2	3	4	5	6	7	8	PROMEDIO
Ra	1.6	0.8	1.7	1.4	1.8	1.6	1.7	1.7	1.5375
Rmax	11.8	18	33.1	12.1	15.7	12.4	15.1	14.8	16.625
Rz	7.8	5.4	12.6	5.7	9.3	6.8	7	8.8	7.925

Es el valor de Rz promedio 7.68

## ANEXO F. REPORTE DE LA DETERMINACIÓN DE MICRODUREZAS

Los valores de dureza calculados pertenecen a la escala de dureza VICKERS, con una carga de 50P. Estos valores fueron tomados del centro hacia el exterior del redondo.

<b>Latón ASTM B 145</b>	
Valores obtenidos con el probador de durezas WILSON	
Valores Di →	114, 123, 125, 126, 127, 134, 137, 132, 137, 148, 150, 158, 161, 164, 168, 168, 168, 164, 168, 168.

Los valores de dureza calculados pertenecen a la escala de dureza VICKERS, con una carga de 50P. Estos valores fueron tomados del centro hacia el exterior del redondo.

<b>Latón ASTM B 455</b>	
Valores obtenidos con el probador de durezas WILSON	
Valores Di →	150, 158, 161, 160, 160, 161, 164, 164, 164, 168, 165, 168, 168, 193, 204, 202, 206, 206, 206, 214.