



# **INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

---

**Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
Unidad Azcapotzalco**

**Sección de Estudios de Posgrado e Investigación**

## **COEFICIENTES TRIBOLÓGICOS PARA ACERO AL CARBON AISI 1045 Y ACERO ALEADO AISI 4140.**

---

**T E S I S PARA OBTENER EL DIPLOMA DE ESPECIALIZACIÓN  
EN INGENIERÍA MECÁNICA CON OPCIÓN: INGENIERÍA DE  
PROYECTO MECÁNICO PRESENTA:**

**ING. AZAEL LEONEL TRUJANO GALICIA**

---

**DIRECTOR: M. en C. JOSÉ RUBÉN AGUILAR SÁNCHEZ**

**MÉXICO D. F. JUNIO 2011**





# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México siendo las 17:00 horas del día 21 del mes de Junio del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIME UA para examinar la tesis titulada:

### COEFICIENTES TRIBOLÓGICOS PARA ACERO AL CARBON AISI 1045 Y ACERO ALEADO AISI 4140.

Presentada por el alumno:

<u>Trujano</u> Apellido paterno	<u>Galicia</u> Apellido materno	<u>Azael Leonel</u> Nombre(s)							
		Con registro: <table border="1"> <tr> <td>B</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>3</td> <td>8</td> </tr> </table>	B	1	0	2	0	3	8
B	1	0	2	0	3	8			

aspirante al diploma de:

### Especialidad en Ingeniería Mecánica

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA

Director de tesis

Dr. JOSÉ RUBÉN AGUILAR SÁNCHEZ

Presidente

Dr. FELIPE HERNÁNDEZ SANTIAGO

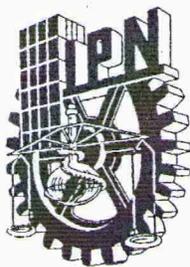
Secretario

M. en I.A. HILARIO BAUTISTA MORALES

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dr. JAIME PACHECO MARTÍNEZ



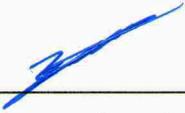


**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*CARTA CESIÓN DE DERECHOS*

En la Ciudad de México, D. F. el día 21 del mes de Junio del año 2011, el que suscribe Azael Leonel Trujano Galicia alumno del Programa Especialización en Ingeniería Mecánica con opción de Ingeniería de Proyecto Mecánico con número de registro B102038, adscrito a SEPI-ESIME-UA, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. José Rubén Aguilar Sánchez y cede los derechos del trabajo intitulado "Coeficientes Tribológicos para Acero al Carbón AISI 1045 y Acero Aleado AISI 4140", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección raguilars@ipn.mx o atrujano@ipn.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

  
\_\_\_\_\_  
Ing. Azael Leonel Trujano Galicia

# ÍNDICE

	Página
ÍNDICE	i
SIMBOLOGÍA	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE GRÁFICAS	vi
RESUMEN	vii
ABSTRAC	vii
OBJETIVO GENERAL	viii
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	viii
JUSTIFICACIÓN	viii
ALCANCE	viii
TRABAJOS A FUTURO	viii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE	4
1.1 HISTORIA Y ANTECEDENTES	5
1.2 APLICACIONES	7
1.3 FUNDAMENTOS DE LA TRIBOLOGÍA	7
a) NATURALEZA DE LA FRICCIÓN	7
b) MECANISMOS Y PROCESOS DEL DESGASTE.	8
c) MODELACIÓN DE LOS PROCESOS TRIBOLÓGICOS	9
d) MODELACIÓN DE TRIBOSISTEMAS	9
e) MATERIALES TRIBOLÓGICOS Y LUBRICANTES.	10
f) NUEVOS MÉTODOS EXPERIMENTALES Y DE DIAGNÓSTICO.	10
g) PROBLEMAS FUNDAMENTALES DE LOS ENSAYOS.	11
h) QUÍMICA DE LOS LUBRICANTES.	11
CAPÍTULO II: ESTUDIO TÉCNICO	12
DESGASTE	13
2.1 ECUACIÓN DE DESGASTE DE ARCHAD	14
2.2 TIPOS DE DESGASTE	15

2.2.1 DESGASTE ADHESIVO	16
2.2.1.1 DESGASTE ADHESIVO SUAVE	18
2.2.1.2 DESGASTE ADHESIVO SEVERO	18
2.2.1.3 ESCOFINADO (GRIPADO INCIPIENTE)	20
2.2.2 DESGASTE ABRASIVO	21
2.2.2.1 INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS EN EL DESGASTE ABRASIVO	23
2.2.2.2 INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES EN EL DESGASTE ABRASIVO	24
2.2.2.3 INFLUENCIA DE LOS EFECTOS AMBIENTALES EN EL DESGASTE ABRASIVO	25
2.2.2.4 DESGASTE ABRASIVO DEBIDO AL MAQUINADO	26
2.2.2.5 DESGASTE ABRASIVO POR FRACTURA FRÁGIL	27
2.2.2.6 DESGASTE DE EROSIÓN POR IMPACTO DE PARTÍCULAS	28
2.2.2.7 DESGASTE ABRASIVO DE TRES CUERPOS	31
2.2.2.8 DESGASTE ABRASIVO POR RANURADO	32
2.2.2.9 RECUBRIMIENTOS PARA DISMINUIR EL DESGASTE ABRASIVO	32
2.2.3 DESGASTE POR FATIGA	33
2.2.3.1 DESGASTE DE PERCUSIÓN	34
2.2.3.2 CAVITACIÓN	34
2.2.3.2.1 EROSIÓN POR CAVITACIÓN	35
2.2.3.3 DESGASTE POR DELAMINACION	36
2.2.4 DESGASTE COMBINADO	37
2.2.4.1 DESGASTE DEBIDO AL MOVIMIENTO OSCILATORIO DE PEQUEÑA AMPLITUD “FRETTING”	37
2.2.4.2 DESGASTE CORROSIVO	38
CAPÍTULO III: ENSAYOS DE DESGASTE Y DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES	40
EQUIPO UTILIZADO:	41
METODOLOGÍA DEL ENSAYE DE DESGASTE	44
DATOS OBTENIDOS EN LA PROBETA DE ACERO 1045	47
DIMENSIONES	47
LECTURAS DE LOS TACÓMETROS:	47
CÁLCULOS, RESULTADOS Y GRÁFICOS DEL ACERO 1045:	51
DATOS OBTENIDOS EN LA PROBETA DE ACERO 4140	55
DIMENSIONES	55
LECTURAS DE LOS TACÓMETROS:	55
CÁLCULOS, RESULTADOS Y GRÁFICOS DEL ACERO 4140:	59
ANÁLISIS DE RESULTADOS	63
ANÁLISIS DE LAS GRÁFICAS	64
CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES TÉCNICAS	66
BIBLIOGRAFÍA	69

## SIMBOLOGÍA

Símbolo	Definición
$\delta Q$	- Volumen de material removido
"	- Pulgada
°	- Grado
°K	- Grados Kelvin
$\mu m$	- Micrómetro
$a$	- Volumen hemisférico
$A_G$	- Área global
$CCI$	- Cuenta ciclos
$CC2$	- Integrador
$C_{ET}$	- Coeficiente específico tribológico
$C_{GT}$	- Coeficiente global tribológico
$cm$	- Centímetro
$D_1$	- Diámetro exterior inicial
$D_2$	- Diámetro exterior final
$D_E$	- Diámetro externo
$D_I$	- Diámetro interno
$G$	- Gramo
$H$	- Dureza de la superficie
$Hr$	- Hora
$HV$	- Dureza Vickers
$k$	- Constante de desgaste
$Kg$	- Kilogramo
$Kg \cdot cm$	- Torque
$Kgf$	- Kilogramo fuerza
$l$	- Longitud
$M$	- Metro
$m^2$	- Metro cuadrado
$min$	- Minuto
$mm$	- Milímetro
$n$	- Ciclos en cada medio abrasivo
$pH$	- Potencial de hidrógeno
$Q$	- Pérdida de volumen por unidad de distancia deslizada
$r.p.m.$	- Revoluciones por minuto
$Rc$	- Dureza Rockwell C
$rev$	- Revoluciones
$S$	- Segundo
$W$	- Carga aplicada
$X$	- Valor desconocido
$\alpha, \theta$	- Ángulo
$\delta V$	- Volumen promedio de desgaste
$\pi$	- Pi = 3.1416

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Descripción	Página
2.1	Diagrama esquemático que muestra la evolución de un contacto individual entre dos asperezas que se mueven una sobre la otra.	14
2.2	Desgaste adhesivo: a) huella producida por una probeta que se deslizó a lo largo de toda la superficie plana, b) huella obtenida en un microscopio electrónico, donde se puede apreciar por medio de las manchas blancas sobre la superficie oscura como parte de la transferencia de material.	17
2.3	Influencia de la carga y la velocidad sobre el desgaste de deslizamiento. Además de las altas cargas y velocidades, también el incremento de la temperatura puede facilitar que nuevamente predomine la capa de óxido provocando un efecto reversible, en el que se presenta un desgaste suave, aun cuando el proceso de desgaste severo ya haya iniciado.	19
2.4	Se muestra en esta micrografía el típico desgaste adhesivo severo, obtenido en un microscopio electrónico de barrido. Las probetas de los materiales son de acero AISI D1, la prueba se realizó en una máquina de prueba de perno sobre disco, el deslizamiento entre los materiales fue de derecha a izquierda.	19
2.5	El agarrotamiento es también otra forma severa de desgaste. La superficie que presenta este tipo de desgaste es de acero inoxidable 316, la cual fue friccionada con otra probeta del mismo material con carga de 1000N.	20
2.6	Influencia del contenido de carbono sobre la tasa de desgaste del acero. La estructura de los aceros con bajo contenido de carbono es ferrítica, en tanto que los que contienen un alto porcentaje presentan una estructura la mayoría de las veces perlítica; estos últimos, tienen superioridad en su dureza debido a que su estructura laminar contiene cementita y ferrita. Por otra parte, las estructuras martensíticas pese a su elevada dureza no presentan destacada resistencia al gripado, ya que la ferrita y la perlita pueden llegar a transformarse en superficies con temperaturas elevadas.	21
2.7	Diferentes situaciones de desgaste abrasivo: a) de dos cuerpos y b) de tres cuerpos.	22
2.8	Desgaste en materiales dúctiles: a) corte, b) formación de brecha y c) formación de surcos.	23
2.9	Tasas de desgaste del cobre bajo condiciones de desgaste abrasivo de dos cuerpos, tres cuerpos y erosión, por efecto de partículas de sic de diferentes tamaños. Aparentemente, el daño que ocasionen las partículas, se encuentra en proporción a su tamaño, sin embargo, durante el proceso de abrasión, incluso se pueden remover partículas grandes con partículas más pequeñas.	24
2.10	Resistencia al desgaste contra dureza en metales puros y aleaciones.	24
2.11	Desgaste abrasivo de la superficie de un acero 1020, lijado con SiC. La superficie presenta características de ranurado, en forma de surcos e	26

	incrustaciones.	
2.12	Resistencia al desgaste para: a) metales puros (círculo claro), metales con tratamiento térmico (círculo oscuro) y aceros endurecidos por trabajo (cuadro). Las pruebas se realizaron en condiciones de abrasión de dos cuerpos, graficada contra dureza de indentación.	27
2.13	Estas micrografías muestran la secuencia de la erosión que le ocasionó el sic con ángulo de incidencia de 30° sobre al aluminio 7075-t6. La velocidad de las partículas se proyectó a una velocidad de 30.5 m/s en la dirección que indica la flecha del dibujo.	28
2.14	Superficie típica de un material comercial dúctil (níquel) sometido a erosión por impacto de partículas de al <sub>2</sub> o <sub>3</sub> de 130 μm de tamaño y velocidad de 53.8 m/s. La erosión se realizó a dos diferentes ángulos de incidencia a) 20° y b) 90°.	29
2.15	Porciones de álabe de turbina de vapor de acero inoxidable 403, con erosión por impacto. Porción a) recubierta en su extremo por una capa protectora de stellite 6b, porción b) no se protegió con nada.	30
2.16	Influencia del ángulo de ataque en la tasa de desgaste abrasivo de los materiales.	30
2.17	Ejemplos de desgaste abrasivo de tres cuerpos.	31
2.18	Efectos de la orientación, tamaño, módulo elástico, dureza y fragilidad de los recubrimientos sobre la resistencia al desgaste abrasivo.	33
2.19	Aluminio policristalino expuesto a cavitación por vibración durante diferentes periodos de tiempo: a) 12 s, b) 24 s, c) 40 s, d) 60 s, e) 75 s y f) 90 s.	35
2.20	Fractura quebradiza en hierro puro ocasionada por cavitación por vibración.	36
2.21	Desgaste típico por delaminación producido por contacto entre metales. El aspecto estructural y la densidad, así como el tipo y las fases dispersantes de los materiales son característicos que determinan la tasa de desgaste por delaminación. Materiales con segunda fase sin enlace y los materiales porosos o con inclusiones, son los que presentan este tipo de desgaste con mayor probabilidad. Por otra parte, los materiales con una sola fase que presentan endurecimiento y los de partículas con enlace de segunda fase, lo resisten.	37
2.22	Topografía de una superficie que ha experimentado desgaste por rozamiento.	38
3.1	Máquina de desgaste por abrasión AMSLER	41
3.2	Partes del integrador de la máquina de desgaste por abrasión AMSLER	42
3.3	Flechas de transmisión de la máquina de desgaste por abrasión AMSLER	43
3.4	Báscula del laboratorio de química	44
3.5	Dimensiones de la probeta de Acero AISI 1045	47
3.6	Ensayo de la probeta de Acero AISI 1045 en Seco.	48
3.7	Ensayo de la probeta de Acero AISI 1045 con Aceite.	49
3.8	Ensayo de la probeta de Acero AISI 1045 con Arena silica.	50
3.9	Ensayo de la probeta de Acero AISI 1045 con Petróleo diáfano.	51

3.10	Dimensiones de la probeta de Acero AISI 4140	55
3.11	Ensayo de la probeta de Acero AISI 4140 en Seco.	56
3.12	Ensayo de la probeta de Acero AISI 4140 con Aceite.	57
3.13	Ensayo de la probeta de Acero AISI 4140 con Arena silica.	58
3.14	Ensayo de la probeta de Acero AISI 4140 con Petróleo diáfano.	59

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Descripción	Página
2.1	Clasificación de los procesos de desgaste.	15
3.1	Lecturas de los tacómetros: Seco con Acero AISI 1045	47
3.2	Lecturas de los tacómetros: Aceite con Acero AISI 1045	48
3.3	Lecturas de los tacómetros: Arena silica con Acero AISI 1045	49
3.4	Lecturas de los tacómetros: Petróleo diáfano con Acero AISI 1045	50
3.5	Lecturas de los tacómetros: Seco con Acero AISI 4140	55
3.6	Lecturas de los tacómetros: Aceite con Acero AISI 4140	56
3.7	Lecturas de los tacómetros: Arena silica con Acero AISI 4140	57
3.8	Lecturas de los tacómetros: Petróleo diáfano con Acero AISI 4140	58
3.9	Resultados de los ensayos de desgaste	63

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica	Descripción	Página
3.1	Gráfica de desgaste obtenida en la máquina de desgaste por abrasión AMSLER del Acero AISI 1045.	54
3.2	Gráfica de desgaste obtenida en la máquina de desgaste por abrasión AMSLER del Acero AISI 4140.	62
3.3	Análisis de la gráfica del Acero AISI 1045.	65
3.4	Análisis de la gráfica del Acero AISI 4140.	65

## **Resumen**

El presente trabajo consta de dos partes. La primera de ellas, relacionada con aspectos teóricos básicos de la tribología, que explica de manera breve el fenómeno de desgaste, y todos aquellos aspectos, con influencia durante su aparición. En estas condiciones, la presencia de los lubricantes, genera un cambio significativo en el comportamiento del fenómeno antes mencionado.

La segunda, abarca la parte experimental, donde se describe el procedimiento de la prueba de desgaste en la máquina AMSLER y como se obtienen de los Coeficientes Tribológicos Específicos y Global de desgaste para el acero al carbón AISI 1045 y acero aleado ASISI 4140, bajo la norma técnica ASTM G-115 – 04. Lo cual nos permitirá analizar el comportamiento de diferentes materiales, y de esta manera predecir el ciclo de vida de piezas de maquinaria que están sometidas a este tipo de desgaste, para saber cuándo cambiar una pieza y ahorrar dinero y tiempo a las industrias.

## **Abstract**

This work consists of two parts. The first, related to basic theoretical aspects of tribology, which briefly explains the phenomenon of wear, and all those aspects with influence over their appearance. Under these conditions, the presence of lubricants, generates a significant change in the behavior of the phenomenon mentioned above.

The second covers the experimental part, which describes the test procedure of wear on the machine and as obtained AMSLER Coefficients Specific and Comprehensive tribological wear for AISI 1045 carbon steel and alloy steel Asisi 4140, under the technical standard ASTM G-115 - 04. Allowing us to analyze the behavior of different materials, and thus predict the lifecycle of machine parts that are subjected to this type of wear, to know when to change a piece and save time and money to industries.

## OBJETIVO GENERAL.

Determinar los coeficientes tribológicos de desgaste global y específico de los aceros grado maquinaria AISI 1045 y AISI 4140, cuando son sometidos en los siguientes medios de abrasión: seco, aceite, arena silica y petróleo diáfano.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Recopilar información de tribología y de los estudios de desgaste, para entender hasta qué punto es importante el estudio de éstos en la ingeniería, y en la industria.
- Conocer el Ensayo AMSLER que nos permitirá conocer el nivel de desgaste de una pieza que estamos trabajando, para predecir cómo se comportará cuando llegue al “mundo real”, según la norma técnica ASTM G115-04.
- Analizar e interpretar los resultados del desgaste a través de la masa perdida en las probetas en diversos medios abrasivos.
- Establecer los coeficientes de desgaste para los aceros AISI-1045 y AISI-4140.
- Aportar información técnica de los aceros grado maquinaria por medio de este ensayo.

## JUSTIFICACIÓN.

La tribología que es una de las ramas de la ingeniería que trata de todo lo relacionado con el uso y duración de los materiales de diferente naturaleza, entre otros como es el caso de los aceros al carbono, de los más representativos de los mismos son el: AISI-1045 y AISI-4140. Conocidos como aceros grado maquinaria y utilizado en la manufactura de todo tipo de piezas y componentes de equipos industriales, hacen necesario un conocimiento de sus características tribológicas para diferentes aplicaciones industriales.

## ALCANCE.

Se determinarán a través de ensayos de desgaste y se presentan de una forma más real y comprensible en las unidades  $\left[\frac{g}{m^2 \cdot hr}\right]$ , lo cual no se encuentra en la bibliografía reciente de estos temas.

Esta forma de mostrarlos, tiene la finalidad de una mejor comprensión e interpretación de dichos coeficientes.

## TRABAJOS A FUTURO.

Se sugiere realizar factores de equivalencia de estos coeficientes, con algunos otros aceros grado maquinaria o bien, determinar de esta misma manera los coeficientes para los mismos aceros, entre otros aceros AISI 52100, AISI 5150, “AISI 8620, 4320 (cementados)” AISI 9840, entre otros, así como también de ser necesarios en la serie de aceros inoxidables AISI (200, 300 y 400).

# INTRODUCCIÓN

---

La tribología es la ciencia y tecnología que estudia la lubricación, la fricción y el desgaste de partes móviles o estacionarias. La lubricación, la fricción y el desgaste tienen una función fundamental en la vida de los elementos de máquinas. La tribología toma en cuenta aspectos como: el diseño, los materiales de las superficies en contacto, el sistema de aplicación del lubricante, el medio circundante y las condiciones de operación. Impacta prácticamente en todas las piezas en movimiento como: rodamientos, chumaceras, sellos, anillos de pistones, embragues, frenos, engranes y levas. Ayuda a resolver problemas en maquinaria, equipos y procesos industriales tales como: motores eléctricos y de combustión (componentes y funcionamiento), turbinas, compresores, extrusión, rolado, fundición, forja, procesos de corte (herramientas y fluidos), elementos de almacenamiento magnético y hasta prótesis articulares (cuerpo humano).

Los pioneros mundialmente reconocidos en utilizar con fines técnico-económicos los conceptos de la Tribología, fueron los ingleses quienes diseñaron un plan de trabajo basado en el estudio de la fricción para reducir el desgaste y el consumo de energía en las máquinas especialmente en el sector automotriz por ser el de mayor incidencia sobre un alto porcentaje de la población.

De ahí en adelante como resultado de los grandes beneficios económicos obtenidos, la Tribología se empezó a utilizar para incrementar la productividad de los procesos industriales, lo cual trajo consigo una considerable reducción en los costos de mantenimiento, consumo de energía por fricción y materias primas.

La necesidad de utilizar la Tribología como una herramienta verdaderamente productiva se observa en aquellos casos en los cuales se pierden grandes capitales por efecto de la fricción, el desgaste y la lubricación incorrecta.

Según E. Rabinowicz [1] las causas de pérdida de utilidad de los objetos materiales son: 15% por anticuado, 15% por descompostura y 70% por deterioro de superficie, siendo aquí donde nos carga el desgaste su factura. El análisis del desgaste es importante porque junto con la fatiga y a la corrosión son los problemas que más fallas causan en las máquinas. De estos tres el menos estudiado ha sido el desgaste. La predicción del desgaste es difícil porque no es una propiedad intrínseca del material, sino que depende de todo el tribosistema con el que interacciona el cuerpo que se desgasta.

Hoy en día las máquinas son las herramientas más fuertes creadas por los seres humanos, éstas realizan trabajos que requieren de exactitud, fuerza, entre otras muchas características que el ser humano sin su ayuda no lograría. El continuo avance requiere máquinas que tengan mejores cualidades en sus materiales, esto garantiza un mejor trabajo y una mayor durabilidad de las piezas que componen las máquinas, por esta razón, es necesario el conocimiento de las características mecánicas y las condiciones a las que van a estar sometidos los materiales. Uno de los grandes problemas que presentan las máquinas es el

desgaste abrasivo, este factor se debe tener en cuenta para el diseño de una máquina, es decir, debemos conocer la resistencia a la fricción y al desgaste de los materiales a ser utilizados. Para una correcta selección de éstos, debemos realizar ensayos, con lo que se pueden determinar los materiales óptimos a utilizar, y alargar la vida útil de las piezas.

Hay casos, como la adaptación de las superficies durante el rodaje, en los que el desgaste evidentemente es deseable. En general, el desgaste es una consecuencia indeseable del rozamiento entre superficies. El hecho de que un componente se desgaste excesivamente nos conduce a la destrucción de la máquina tras superar cierto límite, creando la necesidad de remplazarlo antes de traspasar el límite citado. Un método de reducir la fricción y a menudo el desgaste consiste en lubricar las superficies. El estudio de la lubricación está muy relacionado con la fricción y el desgaste.

Incluso en ausencia de un lubricante exterior, los agentes atmosféricos, en especial el oxígeno y la humedad pueden actuar como verdaderos lubricantes y deben tenerse en cuenta en cualquier estudio de superficies en contacto. La causa de la sustitución del 50% de los elementos de máquinas en la industria y el transporte es el desgaste abrasivo, pudiendo llegar al 85% en caso de la maquinaria agrícola; pero a la vez es la base sobre la cual se sustenta varios métodos de acabados superficiales, como son: el pulido, esmerilado, el lapeado, etc. Como desgaste abrasivo se entiende la modificación de las capas superficiales de los cuerpos sólidos producto de la acción de asperezas o partículas libres de alta dureza al deslizarse sobre otra superficie de menor resistencia mecánica.

La intención principal de la presente tesina, es introducir al lector en el mundo de la tribología y sus aportes en el estudio del desgaste.

En el capítulo I, ofrece una pequeña reseña de cómo es que los desarrollos tribológicos se encuentran íntimamente ligados a la historia de la ciencia.

En el capítulo II, se establecen los principios teóricos relacionados con los fenómenos de desgaste, se establece una clasificación de las formas en que se presenta, especifica los procesos y mecanismos que siguen durante su desarrollo e indica las causas que lo producen y las consecuencias que genera cada uno de ellos.

El capítulo III, trata específicamente de los ensayos experimentales de desgaste y la determinación del Coeficiente Global Tribológico y de los Coeficientes Específicos Tribológicos para diferentes Medios abrasivos, mediante Ensayos AMSLER, en las probetas de Acero 1045 y 4140, conforme a la Norma: ASTM Designación Internacional: G 115-04 Guía estándar para medir e informar sobre los coeficientes de fricción.

En el capítulo IV, corresponde a las conclusiones técnicas del trabajo experimental.

# CAPÍTULO I

## ESTADO DEL ARTE

---

## HISTORIA Y ANTECEDENTES

La Tribología podría parecer algo nuevo, pero es solo la percepción, solamente el término como tal lo es, ya que el interés en temas relacionados con la disciplina existe desde antes de que la historia se escribiera. Como un ejemplo, se sabe que las “brocas” realizadas durante el periodo Paleolítico para perforar agujeros o para producir fuego, eran “fijados” con rodamientos hechos de cornamentas o huesos.

Los documentos históricos muestran el uso de la rueda desde el 3500 A.C., lo cual ilustra el interés de nuestros antepasados por reducir la fricción en movimientos de traslación. Los egipcios tenían el conocimiento de la fricción y los lubricantes, esto se ve en el transporte de grandes bloques de piedra para la construcción de monumentos y pirámides. Para realizar esta tarea utilizaban agua o grasa animal como lubricante.

El artista científico renacentista Leonardo Da Vinci fue el primero que postuló un acercamiento a la fricción. Da Vinci dedujo las leyes que gobernaban el movimiento de un bloque rectangular deslizándose sobre una superficie plana, también, fue el primero en introducir el concepto del coeficiente de fricción. Desafortunadamente sus escritos no fueron publicados hasta cientos de años después de sus descubrimientos. Fue en 1699 que el físico francés Guillaume Amontons redescubrió las leyes de la fricción al estudiar el deslizamiento entre dos superficies planas.

Muchos otros descubrimientos ocurrieron a lo largo de la historia referentes al tema, científicos como Charles Augustin Coulomb, Robert Hooke, Isaac Newton, entre otros, aportaron conocimientos importantes para el desarrollo de esta ciencia.

Al surgir la Revolución Industrial el desarrollo tecnológico de la maquinaria para producción avanzó rápidamente. El uso de la potencia del vapor permitió nuevas técnicas de manufactura.

En los inicios del siglo veinte, desde el enorme crecimiento industrial hasta la demanda de una mejor tribología, el conocimiento de todas las áreas de la tribología se expandió rápidamente.

El concepto de tribología fue usado por primera vez en un informe elaborado por la comisión del Ministerio de educación y Ciencia de la Gran Bretaña el 9 de marzo de 1966, hace exactamente 45 años, por lo que esta fecha se reconoce como la del nacimiento de la tribología como una nueva disciplina científica. Ya en este informe se señalaba con gran justeza el carácter multidisciplinario de esta ciencia, en la que entre otras, participaban la física, la química, la metalurgia, la economía, la ciencia de los materiales, la matemática y la comunicación.

Después de este acto, la tribología se comenzó a reconocerse como fuente de un gran potencial para economizar recursos financieros, materias primas y materiales energéticos. De aquí su enorme importancia y el que se recomendara, haciéndose efectiva por muchos países la estimulación de las investigaciones en la fricción, la lubricación y el desgaste.

En las últimas décadas, la tribología se convirtió en una de las ciencias de más rápido desarrollo. Esto lo confirma el incremento del número de cátedras universitarias creadas en tribología y las recomendaciones y medidas aplicadas por varios gobiernos de países desarrollados, entre estas medidas se encuentran la de formación de cuadros, desarrollo de investigaciones, introducción tecnológica de resultados y creación de centros especializados.

El termino tribología viene del termino griego *tribos*, que significa frotamiento o rozamiento y *logía* que viene a ser ciencia, por tanto la traducción literal será “la ciencia del frotamiento”.

La mayoría de las consecuencias de la fricción y el desgaste se consideran negativas, tales como el consumo de energía y la causa de las fallas mecánicas, sin embargo existen beneficios fundamentales de la fricción y el desgaste. La interacción neumático y el piso por ejemplo o el zapato y el suelo, sin los cuales trasladarse sería imposible.

La fricción sirve como el mecanismo de conexión inherente en los nudos, los clavos y el conjunto tuerca tornillo.

El esfuerzo de diseño no solo debe ser menor que el esfuerzo permisible y la deformación no debe exceder ningún valor máximo, sino que la lubricación, la fricción y el desgaste (consideraciones tribológicas) también deben ser apropiadamente comprendidas para que los elementos de máquinas se diseñen con éxito.

Es reconocida como fuente de gran potencial para economizar recursos financieros además de la preservación de activos físicos, materias primas y recursos energéticos. También como una ineludible forma de hacer Mantenimiento Proactivo en equipos y maquinarias.

Como en la resistencia de materiales, la tribología es la base para cada diseño de ingeniería de elementos de máquinas. Casi ningún elemento de máquina no depende de consideraciones tribológicas.

Para entender a la tribología se requiere de conocimientos de física, de química y de la tecnología de materiales. Las tareas del especialista en tribología (tribólogo) son las de reducir la fricción y desgaste para conservar y reducir energía, lograr movimientos más rápidos y precisos, incrementar la productividad y reducir el mantenimiento.

Con la tribología como ciencia se estudia la fricción y sus efectos asociados, como el desgaste, tratando de prevenirlos con mejores diseños y prácticas de lubricación. Toma en cuenta, entre otros aspectos de la maquinaria industrial, los siguientes:

- El diseño
- Los materiales de las superficies en contacto
- El sistema de aplicación del lubricante
- El medio circundante
- Las condiciones de operación

## APLICACIONES [1]

La tribología está presente prácticamente en todas las piezas en movimiento tales como:

- Rodamientos
- Chumaceras
- Sellos
- Anillos de pistones
- Embragues
- Frenos
- Engranajes
- Árboles de levas

La tribología ayuda a resolver problemas en maquinaria, equipos y procesos industriales tales como:

- Motores eléctricos y de combustión (componentes y funcionamiento)
- Turbinas
- Compresores
- Extrusión
- Rolado
- Fundición
- Forja
- Procesos de corte (herramientas y fluidos)
- Elementos de almacenamiento magnético
- Prótesis articulares (cuerpo humano)

## FUNDAMENTOS DE LA TRIBOLOGÍA [2]

Las principales demandas industriales en la investigación de problemas tribológicos han sido divididos por ramas, los cuales son los siguientes:

### a) Naturaleza de la fricción

La fricción es el objetivo fundamental de estudio en la tribología. Los trabajos hasta ahora desarrollados han aportado conocimientos importantes en el área real de contacto, la adhesión y el surcado; no obstante, una teoría completamente elaborada aún no se ha logrado.

El problema fundamental reside en que la fricción depende de un sinnúmero de procesos complejos en la superficie de contacto.

El conocimiento principal quizás sea el área de contacto, ya que el resto de los procesos están muy condicionados con éste. Muchos trabajos actuales dirigidos a estudiar la topografía de la superficie de contacto y el cálculo del área real de contacto. Sin embargo, un método experimental efectivo para ello aún no ha sido elaborado. Resulta indispensable para el desarrollo de este tema, elaborar un método directo experimental de medición del área real de contacto.

En muchos contactos tribológicos, las superficies de las capas se diferencian por la estructura y/o por la composición química. Esto influye en las reacciones triboquímicas entre las superficies de contacto. A veces este material se forma por desgaste de ambas superficies y productos de reacciones químicas, por ejemplo óxidos.

La fricción y el desgaste dependen de la formación y destrucción de estas capas. Es por ello que en cualquier investigación es necesario caracterizar las superficies en contacto y tener en cuenta la influencia de las capas superficiales.

La probabilidad mayor de la causa de la aceleración de las reacciones durante el proceso de fricción lo es la variación y disminución del espesor de la capa reactiva superficial, debido al desgaste y el incremento de la difusión de elementos por el aumento de temperatura por efecto de la deformación plástica. La naturaleza de las reacciones triboquímicas y la cinética de formación de las capas superficiales deben ser determinadas para cada caso concreto, teniendo en cuenta su influencia decisiva en el coeficiente de fricción y en la intensidad del desgaste.

El llamado “tercer cuerpo” o material desprendido, producto del desgaste, influye en el coeficiente de fricción. Por tanto, en todo proceso se hace indispensable su caracterización.

#### b) Mecanismos y procesos del desgaste.

En los últimos años se establecieron muchos mecanismos y procesos de desgaste, tales como el adhesivo, el abrasivo, el de fatiga, el de corrosión y el de separación o desprendimiento por capas. La mayoría de estos mecanismos han sido confirmados por ensayos de laboratorio; pero, el área o región donde cada uno se produce no ha sido totalmente definida. En la mayoría de los sistemas tribológicos, en el proceso de desgaste, intervienen varios mecanismos, lo que hace muy complejo identificar el mecanismo predominante y seleccionar la forma concreta de contrarrestar los efectos del desgaste. Es por ello que es conveniente siempre tratar de clasificar estos mecanismos en cada sistema tribológico concreto, estableciendo una correlación entre el mecanismo de desgaste y el proceso real en que éste ocurre. Es necesario, además tener en cuenta los cambios que tienen lugar en el mecanismo de desgaste, lo que en ocasiones implica una influencia catastrófica en la vida útil del elemento o máquina.

Para el análisis de cada proceso debe hacerse un análisis de sistema donde se plasmen las condiciones concretas de trabajo de éste (p- ej- carga, temperatura, velocidad, etc.), así como el desgaste específico, su intensidad y forma del coeficiente de fricción. Es conveniente que el sistema sea tratado matemáticamente mediante el uso de técnicas de cómputo.

Es de suma importancia la caracterización de las capas superficiales (geometría, estructura y propiedades mecánicas), así como la forma de contacto entre ellas y la acción del medio ambiente y los procesos térmicos en el sistema.

### c) Modelación de los procesos tribológicos

En la modelación de los procesos tribológicos ha habido avances, sobre todo en lo que a lubricación hidrodinámica se refiere. Mucho más atrasada está la modelación en los modelos comunes de fricción, lubricación límite y desgaste. Esto se debe a lo complejo de la interacción en la superficie de contacto y por ello hay que acometer en esto del trabajo en forma multidisciplinaria.

Los modelos deben ser elaborados con base en principios físicos conocidos y determinar claramente las características de los contactos tribológicos que se producen. Deben permitir la selección correcta de los materiales a utilizar así como determinar el coeficiente de fricción la intensidad del desgaste y la máxima vida útil de la máquina.

La modelación tiene dos formas fundamentales de trabajarse. Una es la de seleccionar empíricamente los factores que intervienen, donde debe incluirse la caracterización de la superficie, y una posterior investigación a nivel laboratorio, con cuyos resultados convenientemente procesados, se conforma un modelo empírico. Este sistema exige de gran tiempo.

La otra variante se basa en la formulación del modelo basada en principios físicos conocidos y su posterior comprobación con los datos experimentales obtenidos, después de lo cual se corrige el modelo.

Como puede apreciarse cada forma de modelación tiene sus ventajas e insuficiencias, por lo que en ocasiones es preferible el uso convenientemente combinado de ambas formas.

Cada modelo teórico debe ser comprobado y corregido según los datos experimentales para garantizar su aplicación en la práctica.

### d) Modelación de tribosistemas

Los modelos de lubricación tienen que ser modernizados a partir de tener en cuenta el efecto de la rugosidad superficial, y debe garantizar la posibilidad de calcular la fricción en la superficie de contacto. La mayoría de los modelos actuales se basan en modelos newtonianos y condiciones estacionarias.

Debe completarse el uso de modelos no newtonianos y procesos cambiantes y considerar la influencia de los procesos térmicos, la turbulencia y la destrucción de la capa límite.

La aparición de partículas, por ejemplo, impurezas o suciedades y productos del desgaste, destruyen el normal comportamiento de la mayoría de los sistemas tribológicos, por lo que su influencia debe ser considerada, y valorados los cambios que se producen en el tribosistema.

La mayoría de los sistemas de pronóstico o rechazo actuales tienen en cuenta sólo un nodo en la máquina.

Es necesario construir modelos de varios nodos que permitan diagnosticar el comportamiento de la máquina. La construcción de este modelo integral, puede hacerse por etapas, elaborando en cada una el modelo para cada modo seleccionado.

e) Materiales tribológicos y lubricantes.

Hoy se comprende claramente la necesidad del incremento de la efectividad de los sistemas técnicos.

Para ello, es indispensable la investigación, desarrollo e introducción en la práctica de materiales y de lubricantes de alta calidad.

La tendencia es la de incrementar la resistencia al desgaste en condiciones extremas de trabajo (cargas, temperatura, medio ambiente, altas velocidades).

Un papel importante en esto lo pueden jugar las diferentes tecnologías de recubrimiento, los composites y los materiales cerámicos, para los cuales debido a ser aplicaciones modernas, no se han elaborado completamente características tribológicas, posibilidades de aplicación y limitaciones.

Se incrementa la tendencia al uso de lubricantes sólidos sobre todo para ser usados en los casos de lubricación a temperaturas elevadas y con adición de componentes contra la oxidación. Es por ello que la tribología tiene que trabajar en la caracterización de estos lubricantes, sus mecanismos y elaborar modelos menos empíricos que los actuales.

f) Nuevos métodos experimentales y de diagnóstico.

La complejidad de las interacciones físicas y químicas en los tribocontactos hacen necesario el prestar especial atención al desarrollo de nuevos métodos experimentales de investigación y de caracterización de las superficies.

Actualmente, se emplean muchos instrumentos y métodos, para caracterizar las superficies; sin embargo, cada uno tiene dificultades e insuficiencias. La mayoría de los métodos, se basan en análisis post-avería y no ofrecen información directa sobre la naturaleza de los procesos tribológicos. Es necesario desarrollar métodos que permitan el análisis durante el funcionamiento de los pares de fricción o nudos. De igual forma se necesitan métodos efectivos y económicos para el diagnóstico de la explotación de los nudos.

g) Problemas fundamentales de los ensayos.

En ausencia de modelos comunes, la mayoría de los procesos tribológicos se ensayan, basado en los resultados experimentales, para proyectar o seleccionar los materiales necesarios de los sistemas tribológicos.

Los datos experimentales serán útiles si caracterizan completamente los materiales ensayados, su superficie y lubricación, y si las condiciones de ensayo y el medio ambiente son también controlados. Si los experimentos se ejecutan para modelar un nudo tribológico concreto, las condiciones de ensayo deben corresponderse con las reales de trabajo.

Debe garantizarse, mediante la adecuada recepción y procesamiento de los datos, toda la información extraída de las investigaciones y promover su publicación en artículos, eventos, normas y otros documentos técnicos.

#### h) Química de los lubricantes.

Los materiales lubricantes industriales generalmente están compuestos de una base de aceite y diferentes aditivos que determinan propiedades concretas para su explotación. Los materiales lubricantes típicos están formados por cientos de diferentes tipos de moléculas que de forma compleja interactúan entre ellas. Los problemas fundamentales a investigar en la química de estos lubricantes están relacionados con las propiedades de los aditivos y las interacciones capa-lubricante.

# CAPÍTULO II

## ESTUDIO TÉCNICO:

---

## DESGASTE

En términos generales podemos decir que son tres los procesos que limitan la vida de los productos metálicos que nos proporcionan bienestar: desgaste, corrosión y fatiga. Los ejemplos son diversos, pero algunos representan al desgaste como la peor limitación de vida de los productos. Considerar por ejemplo, el desgaste que se presenta entre la pared del cilindro y los anillos del pistón en una máquina de combustión interna diesel, o bien, una herramienta metálica que se desgasta al inicio y durante el proceso de corte.

El desgaste se manifiesta en diferentes grados, algunas veces puede ser tolerado hasta cierto grado, otras es benéfico inclusive. A pesar de que existen diversos métodos para reducirlo, su presencia representa considerables pérdidas económicas.

Una interesante alternativa para disminuir el desgaste en los materiales, es mediante el uso de recubrimientos y tratamientos superficiales. Los recubrimientos, se depositan sobre la superficie de los materiales donde se genera el desgaste por diversos procesos. Los tratamientos superficiales se logran siguiendo técnicas específicas.

La tasa de desgaste que se produce en los materiales se define como la pérdida de volumen de la superficie de desgaste por unidad de distancia deslizada. Las condiciones que producen el desgaste pueden estar influenciadas por diversos factores, por ejemplo, el desgaste en seco, depende de la carga normal, la velocidad relativa de deslizamiento, temperatura inicial y de las propiedades mecánicas, térmicas y químicas de los materiales en contacto. Cuando existe entre la interfase un tercer cuerpo, entonces la situación se torna más compleja.

Existe gran variedad de recubrimientos y tratamientos superficiales resistentes al desgaste; seleccionar cualquiera de ellos, requiere necesariamente de realizar pruebas en el laboratorio. Inicialmente, se debe conocer el tipo de desgaste que se presenta en el componente a través de las condiciones de operación a las que se encuentra sometido, así como de elaborar una lista de los posibles recubrimientos a utilizar, y sobre todo, consultar de los que ya hayan sido aplicados con cierto éxito.

Generalmente las superficies sufren desgaste simultáneamente por dos o más procesos. Debido a que algunos de ellos son dominantes, algunas veces se deben de generar las condiciones para balancearlos, controlando la pérdida de partículas generadas durante el deslizamiento por efecto del ciclo de trabajo, tipo de vibración, entre otros factores.

Si a futuro somos capaces de predecir y controlar el desgaste, el periodo de vida de la maquinaria se prolongará enormemente.

## 2.1 ECUACION DE DESGASTE DE ARCHAD

Holm y Archad [3] realizaron un análisis teórico mediante un modelo simple para describir matemáticamente el desgaste de deslizamiento. Para ello, consideraron las variables principales que tienen influencia durante el proceso, cuyo resultado es ampliamente utilizado para calcular el desgaste en casi todos los tipos de materiales.

En la Figura 2.1, se muestra el esquema utilizado por estos dos investigadores. Considerando que la aspereza de la figura tiene un radio  $a$ , el contacto de deslizamiento evoluciona hasta que en el punto medio, las asperezas entran en contacto total. En esta condición, la carga normal soportada es igual a  $\delta W = P\pi a^2$ , donde  $P$  es la presión de cedencia para la deformación plástica de la aspereza. A medida que transcurre el deslizamiento, se conduce a la destrucción y formación de contactos individuales, y algunas de las asperezas son progresivamente transferidas a otras uniones que se forman sobre la superficie misma.

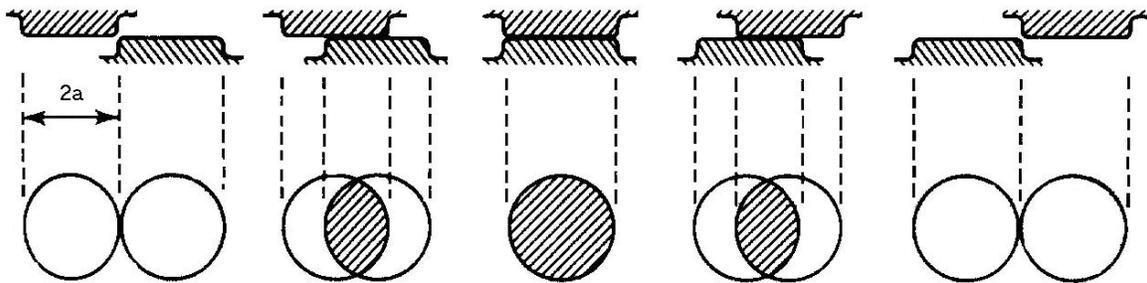


Figura 2.1 Diagrama esquemático que muestra la evolución de un contacto individual entre dos asperezas que se mueven una sobre la otra.

El desgaste se asocia con la adición de fragmentos de material de las asperezas y el volumen de cada uno de los fragmentos de desgaste, que dependen del tamaño de la unión de la aspereza de donde es originada. Por tanto, el volumen del material removido es  $\delta Q$ , proporcional al cubo de la dimensión de contacto  $a$ , lo cual implica que la forma de la partícula de desgaste debe ser independiente de su tamaño.

Considerando el volumen hemisférico de radio  $a$  se tiene:

$$\delta Q = \frac{2\pi a^3}{3} \quad 2.1$$

De todas las asperezas en contacto, solo una proporción ( $k$ ) de ellas se involucra en el desgaste, de modo que el volumen promedio de desgaste por unidad de distancia deslizada, debido al deslizamiento de un par de asperezas a lo largo de la distancia  $2a$  está dado por:

$$\delta Q = \frac{k\delta V}{2a} = \frac{k\pi a^2}{3} \quad 2.2$$

Considerando la suma de todas las asperezas del área real de contacto:

$$Q = \Sigma \delta Q = \frac{k}{3} \Sigma \pi a^2 \quad 2.3$$

La carga normal total es:

$$W = \Sigma \delta W = P \Sigma \pi a^2 \quad 2.4$$

Por tanto

$$Q = \frac{kW}{3P} \quad 2.5$$

Al combinar el factor de proporcionalidad de  $\frac{1}{3}$  dentro de la constante de proporcionalidad, asignando  $k = \frac{k}{3}$  y asumiendo que P es igual a la dureza de indentación, se obtiene la ecuación que relaciona a la pérdida de volumen por unidad de distancia deslizada con cantidades macroscópicas, con la carga y la dureza de la superficie del material, denominada ecuación de desgaste de Archad.

$$Q = \frac{kW}{H} \quad 2.6$$

Donde:

Q - Pérdida de volumen por unidad de distancia deslizada.

k - Constante, usualmente llamada constante de desgaste.

W - Carga aplicada.

H - Dureza de la superficie.

## 2.2 TIPOS DE DESGASTE [4]

Los procesos de desgaste se han clasificado siguiendo diferentes criterios, aunque la mayoría coincide en términos generales. Uno de ellos, es como se muestra en la **Tabla 2.1**, e incluye: desgaste adhesivo, desgaste abrasivo, desgaste por fatiga y desgaste combinado.

**Tabla 2.1** Clasificación de los procesos de desgaste.

Tipo de desgaste	Clasificación
Desgaste Adhesivo	Desgaste suave
	Desgaste severo y escofinado
Desgaste Abrasivo	Desgaste debido al maquinado
	Abrasión por fractura frágil
	Erosión por impacto de partículas
	Abrasión de tres cuerpos
	Abrasión por ranurado
Desgaste por fatiga	Fatiga por contacto
	Desgaste de percusión
	Erosión por cavitación
	Desgaste por delaminación
Desgaste combinado	Desgaste por movimiento oscilatorio de pequeña amplitud (fretting)
	Desgaste corrosivo

A continuación se describe de manera breve, la explicación de los procesos de desgaste.

### 2.2.1 DESGASTE ADHESIVO

Se presenta entre dos componentes que se encuentran en movimiento relativo, genera después de cierto tiempo, partículas o residuos de desgaste, y permite incluso, la transferencia de material de un componente al otro. El proceso se presenta debido a que al acercarse los cuerpos en cuestión pueden entrar en contacto algunas de sus asperezas opuestas; como éstas sufren deformación por la acción de las fuerzas interatómicas, pueden incluso llegar a unirse. Además, el material base puede cizallarse o fluir si las condiciones de enlace son lo suficientemente fuertes, proporcionándole endurecimiento.

El proceso de desgaste adhesivo ocurre por efecto del deslizamiento de una superficie sólida sobre otra. La adhesión en sí no es causa de desgaste, sino la consecuencia del contacto; el desgaste ocurre cuando se inicia el movimiento de las interfases, y entonces, ocurre daño en una o en ambas superficies, con tasas de desgaste diferentes. Este tipo de desgaste es muy característico y se diferencia del resto, ya que presenta dificultades para identificar las causas reales que lo producen.

Algunas veces, no existe pérdida de material en el sistema, pero si hay o existe daño superficial, condición que ocurre cuando se presenta una falla o daño grave en la superficie, denominado como agarrotamiento “galling”, equivalente a una excoiación severa, denominada “scuffin”, donde se sueldan algunas asperezas por la acción del calor. Con este último proceso de desgaste, la adhesión está íntimamente relacionada.

Es posible identificar una serie de pasos antes de constituirse la formación de partículas de desgaste adhesivo.

- Deformación de los contactos de las asperezas.
- Remoción de capas de óxido superficiales.
- Formación de uniones o empalmes adhesivos.
- Falla adhesiva de las uniones y transferencia de material.
- Modificación de los fragmentos en transferencia.
- Remoción de fragmentos en transferencia y pérdida de partículas de desgaste.

El desgaste adhesivo tiene influencia de varios parámetros que caracteriza a los elementos en cuestión, entre ellos:

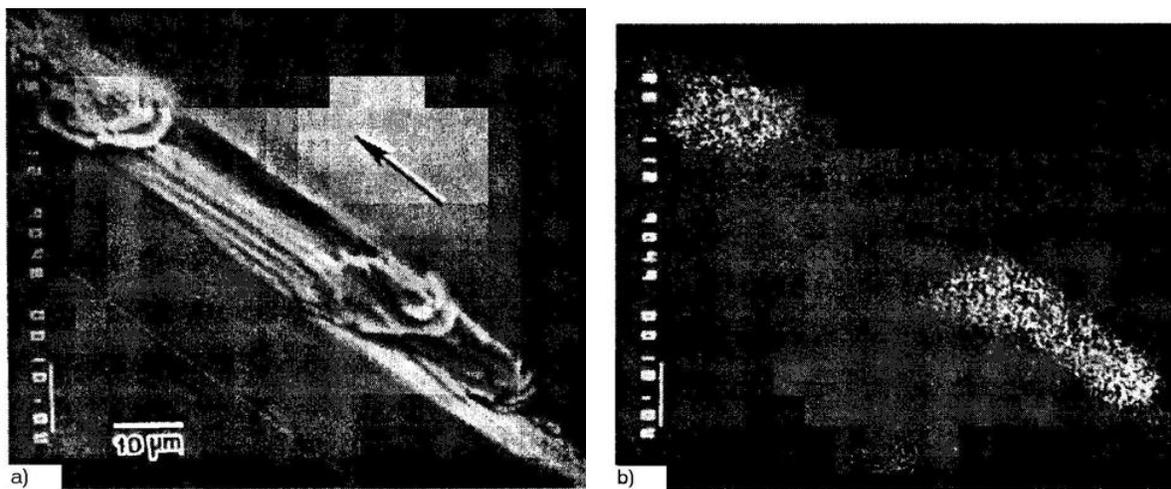
- Estructura electrónica.
- Estructura cristalina.
- Orientación del cristal.
- Fuerza cohesiva.

Difícilmente es posible encontrar materiales limpios, sobre todo porque pueden ser “contaminados” por la atmósfera en la cual se hallan inmersos. Las superficies de deslizamiento deben ser limpias, libres de residuos de grasas, óxidos, y totalmente secas. La presencia de recubrimientos de delgadas capas y la estructura de las superficies, son factores que intervienen en el anclaje o adhesión con el sustrato.

Si las superficies en deslizamiento que interactúan son de materiales diferentes, al presentarse el contacto entre sustratos, la fuerza de enlace entre ambos aumentará hasta llegar al punto de mezcla o aleación por difusión, en tanto que cuando los metales son del mismo material, éstos se unirán con mucha mayor facilidad.

En la **Figura 2.2**, se muestra con gran claridad dos ejemplos de procesos de desgaste adhesivo, donde es posible observar la transferencia de material.

Durante el deslizamiento de las superficies, dependiendo de las condiciones que prevalezcan, puede presentarse ya sea un flujo plástico, o bien una fractura en el material. Algunos residuos que constituyen la turbulencia, pueden hacer acto de presencia una vez que el deslizamiento ha cesado.



*Figura 2.2 Desgaste adhesivo: a) Huella producida por una probeta que se deslizó a lo largo de toda la superficie plana, b) Huella obtenida en un microscopio electrónico, donde se puede apreciar por medio de las manchas blancas sobre la superficie oscura como parte de la transferencia de material.*

La tasa de desgaste que se registre en el proceso, será función de las propiedades específicas de cada uno de los componentes presentes, aunque también para los mismos efectos, dependa de algunas características como son: forma, contacto entre cuerpos, temperatura, reactividad química, y las condiciones ambientales entre otras.

Para determinar la tasa de desgaste, lo más conveniente es simular los componentes del mecanismo en estudio, someterlos al laboratorio, para verificar el cambio superficial que progresivamente se presenta, considerando la fricción y la apariencia de la huella de desgaste.

Resulta un tanto difícil cuantificar el desgaste adhesivo, debido a que durante el proceso intervienen muchas variables, dentro de las cuales algunas ya se han determinado y otras e prácticamente imposible su medición. La ecuación de Archad es la más generalizada en la literatura; dicha ecuación incluye pocas variables y ofrece resultados confiables.

### 2.2.1.1 DESGASTE ADHESIVO SUAVE

Cuando se encuentran limpios, diversos metales se adhieren o sueldan fuertemente; pero si se encuentran a condiciones de atmósfera normal, sus superficies se cubren con una capa de gases, vapores o productos que pueden reaccionar químicamente, generalmente formando óxidos. Esta capa, que por lo general es muy fácil de penetrar por asperezas duras, causa una adhesión entre las superficies, debido a que sus uniones tienen poca resistencia al rompimiento. Una vez que se penetra la fina capa de óxido, en uno o en ambos componentes, se ponen al descubierto de inmediato, algunas superficies libres de impurezas, las cuales tienden a unirse a la superficie opuesta.

El desgaste adhesivo, se presenta siempre y cuando las condiciones de desgaste no sean lo suficientemente severas en la remoción de la capa de óxido. También se presenta cuando la carga de deslizamiento es moderada y cuando las superficies interactuantes son de pobre adhesión.

Las superficies endurecidas y los factores de orden microestructural, son factores que incrementan el desgaste adhesivo moderado; aunque, si la estructura presenta discontinuidad, éste se reduce drásticamente.

Durante el arranque inicial, las máquinas, en la mayoría de sus elementos experimentan instantáneamente desgaste adhesivo severo. De acuerdo a la Figura 2.13, partiendo de cero y a valores bajos de carga y velocidad, se tiene un rango de desgaste adhesivo suave. Con el incremento de carga y velocidad, súbitamente se presenta un cambio y el desgaste se vuelve severo. Posteriormente, al aumentar sustancialmente los valores de carga y velocidad, nuevamente se tiene otro rango de desgaste adhesivo suave.

Los tratamientos térmicos de baja temperatura, semejantes al fosfatado se utilizan para mejorar la resistencia al desgaste y el gripado incipiente en pequeños engranes, sobre todo durante el periodo de arranque inicial. Para minimizar el desgaste adhesivo, que se manifiesta en forma de ranuras, se prefiere en la práctica que los pares de piezas deslizantes sean de dureza superficial diferente.

### 2.2.1.2 DESGASTE ADHESIVO SEVERO

La tasa de desgaste adhesivo severo es, por mucho, mayor a la del desgaste adhesivo suave. Se presenta cuando se tienen cargas medias y velocidades moderadas o cuando la capa de óxido es estable en sus superficies. Existen valores de carga y velocidad críticos en los que se presenta una transición entre el desgaste adhesivo suave y severo. Al seguir incrementando los valores de carga y velocidad, nuevamente se presenta la transición de desgaste adhesivo severo a suave. En el caso de incremento de velocidad, la tasa de desgaste adhesivo severo se incrementa considerablemente hasta alcanzar su máximo, y disminuye nuevamente cuando se vuelve suave. La **Figura 2.3**, presenta en forma gráfica este comportamiento, donde se establece la influencia que la carga y la velocidad tienen durante el desgaste por deslizamiento.

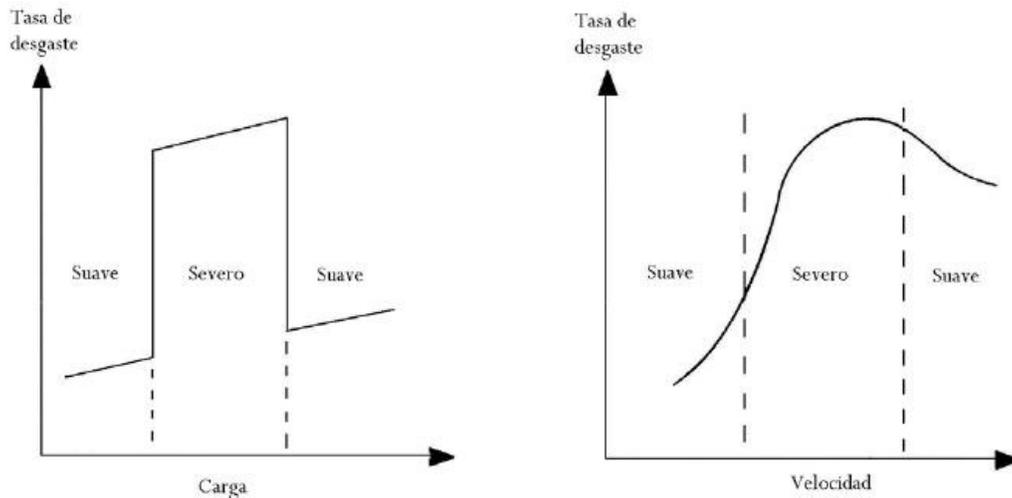


Figura 2.3 Influencia de la carga y la velocidad sobre el desgaste de deslizamiento.

Además de las altas cargas y velocidades, también el incremento de la temperatura puede facilitar que nuevamente predomine la capa de óxido provocando un efecto reversible, en el que se presenta un desgaste suave, aún cuando el proceso de desgaste severo ya haya iniciado.

La tendencia de los materiales que son resistentes a la oxidación y a la corrosión es, que presentan limitada resistencia al desgaste adhesivo. Sin embargo, cuando la presencia de óxido libre es grande, puede llegar a presentarse dicho desgaste. En la **figura 2.4**, se presenta un caso típico de desgaste adhesivo severo.

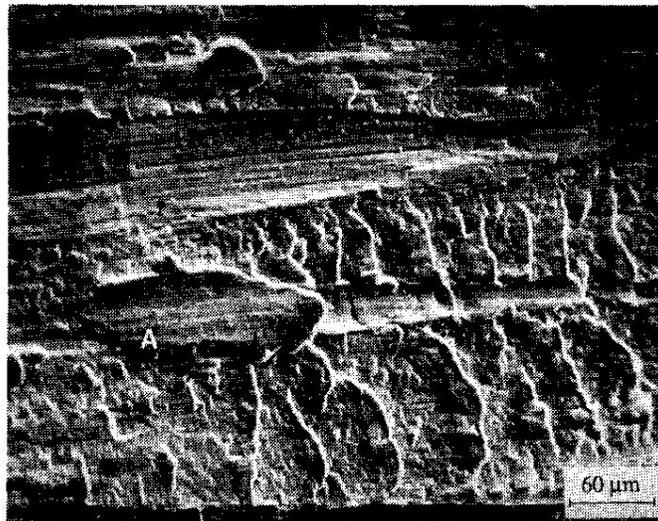


Figura 2.4 Se muestra en esta micrografía el típico desgaste adhesivo severo, obtenido en un microscopio electrónico de barrido. Las probetas de los materiales son de acero AISI D1, la prueba se realizó en una máquina de prueba de perno sobre disco, el deslizamiento entre los materiales fue de derecha a izquierda.

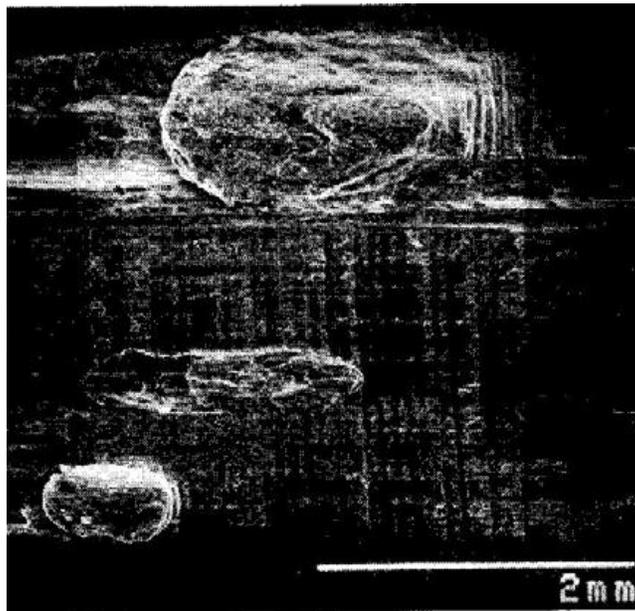
### 2.2.1.3 ESCOFINADO (GRIPADO INCIPIENTE) [5]

Si entre las superficies metálicas deslizantes existe una película de lubricante, cuando ésta se rompe, debido al incremento de la temperatura, se presenta un desgaste parecido al adhesivo severo, llamado escofinado o gripado incipiente, con rompimiento y flujo plástico del material. Es importante que, entre menos adhesión presenten los materiales, éstos

tendrán mayor resistencia al desgaste severo y al gripado incipiente [20]. Por ejemplo, en los aceros con contenido de carbono, las tasas de desgaste se reducen considerablemente cuando éste se incrementa.

El agarrotamiento, conocido en la literatura inglesa como “galling”, es una forma de desgaste adhesivo severo. En la **Figura 2.5**, se tiene su representación física.

El gripado incipiente es un tipo de desgaste adhesivo que se caracteriza por presentarse en operación de alta carga, ocasionando incremento en la temperatura y daños significativos. En las paredes de los cilindros y los anillos de pistón, donde se combinan altas velocidades de deslizamiento y concentración de carga, es realmente manifiesto dicho desgaste. La función de los anillos es sellar la cámara de combustión durante el deslizamiento del pistón a lo largo de la pared del cilindro, evitando el paso de aceite a la cámara de combustión. En operación normal, el cilindro y el pistón se lubrican hidrodinámicamente sometiéndose a desgaste adhesivo suave, pero en periodos de aceleración, la lubricación no es suficiente y se presenta el desgaste en forma de gripado incipiente



*Figura 2.5 El agarrotamiento es también otra forma severa de desgaste. La superficie que presenta este tipo de desgaste es de acero inoxidable 316, la cual fue friccionada con otra probeta del mismo material con carga de 1000N.*

Algunas veces, el gripado es ligero y se caracteriza por presentar una huella opaca; contrariamente, cuando es severo, se tienen manifestaciones de desprendimiento metálico en la dirección de deslizamiento.

El empleo de materiales distintos o de baja solubilidad mutua, actúan con gran resistencia al desgaste severo y al gripado; aunque también la microestructura de los materiales es factor determinante para prevenirlo.

En los aceros, una dureza mayor a 700 HV es benéfica, aunque se debe de tener en cuenta las condiciones de calentamiento por fricción, ya que incrementan la temperatura y ablandan las superficies.

La **Figura 2.6**, se muestra la influencia del contenido de carbono en relación a la tasa de desgaste del acero. La prueba se realizó en una máquina Amsler de discos encontrados, donde se utilizaron tres discos de acero con diferente contenido de carbono y lubricados con aceite SAE 30.

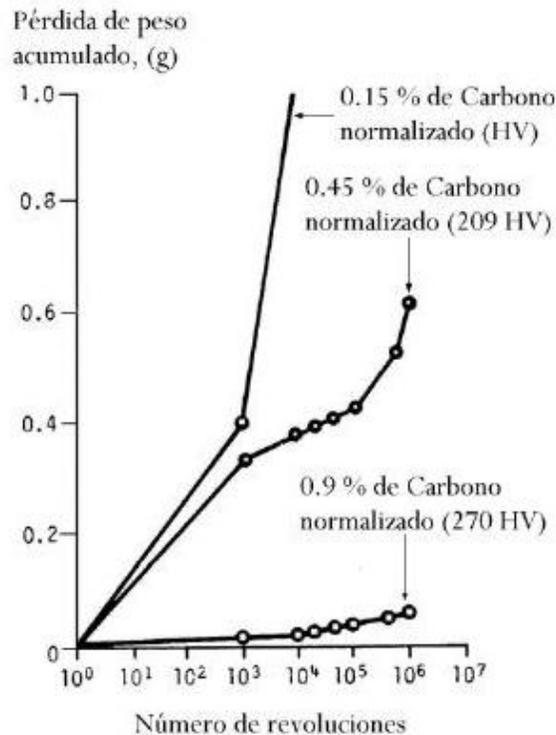


Figura 2.6 Influencia del contenido de carbono sobre la tasa de desgaste del acero.

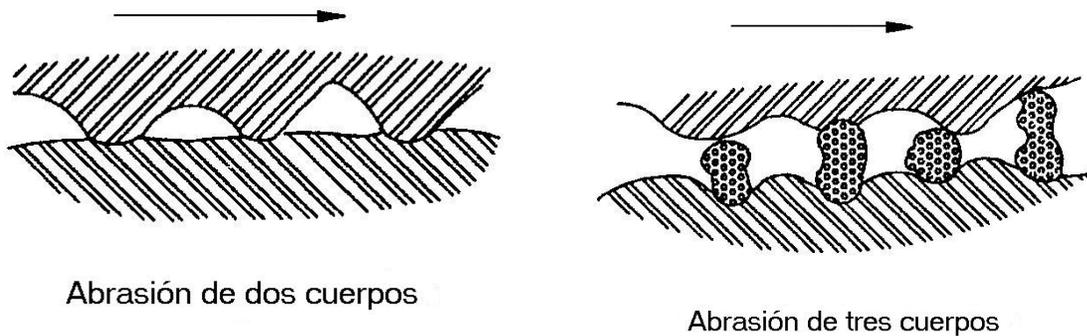
La estructura de los aceros con bajo contenido de carbono es ferrítica, en tanto que los que contienen un alto porcentaje presentan una estructura la mayoría de las veces perlítica; estos últimos, tienen superioridad en su dureza debido a que su estructura laminar contiene cementita y ferrita. Por otra parte, las estructuras martensíticas pese a su elevada dureza no presentan destacada resistencia al gripado, ya que la ferrita y la perlita pueden llegar a transformarse en superficies con temperaturas elevadas.

## 2.2.2 DESGASTE ABRASIVO

Es causado por el efecto de partículas o protuberancias duras, las cuales golpean o son forzadas a moverse a lo largo de una superficie sólida ocasionando daño y pérdida progresiva de material. Una vez que el material duro penetra en la superficie, la remoción del material se realiza por uno o varios mecanismos a la vez. En particular, en este proceso de desgaste ocurre como corte, rayado, astillado o rompimiento por fatiga. Las propiedades del material, el tipo de movimiento y la carga tienen marcada influencia durante la remoción del material.

La tasa de desgaste no solo depende del material y sus características superficiales, sino también de la presencia de partículas abrasivas entre las superficies, de la velocidad de contacto y de las condiciones del ambiente.

El fenómeno de desgaste por abrasión, se genera por tres procesos: dos cuerpos, tres cuerpos y fractura frágil. El primero, ocurre cuando un material duro se desliza a lo largo de una superficie sólida más blanda. Mientras, que el segundo, se presenta cuando, entre superficies en deslizamiento, existe material abrasivo que se atrapa, mismo que actúa sobre la superficie blanda, causándole daño significativo. En la **Figura 2.7**, se muestra los procesos de dos y tres cuerpos. El proceso de desgaste por fractura frágil se explica con detalle en el punto **2.2.2.5**.



*Figura 2.7 Diferentes situaciones de desgaste abrasivo: a) De dos cuerpos y b) De tres cuerpos.*

Existe otra forma de abrasión, que es el “goging” [6], o sea la abrasión severa por ranurado, donde el desplazamiento del material en cuestión puede ocurrir solo o combinado a través de formación de surcos o canales, creación de brecha, corte, micro fatiga y micro rompimientos. La formación de surcos ocurre durante el proceso en el que el material solo se desplaza hacia los lados formando un canal sin pérdida de material. Esto, generalmente, ocurre a cargas pequeñas. Algunas veces, el material desplazado hacia los lados es mayor que el desplazado por la acanaladura. Esto, se debe a que la resistencia al corte del cuerpo ha sido rebasada por la punta cortante. La formación es entonces una brecha, constituyendo una forma suave de desgaste abrasivo.

Durante el proceso de corte, la forma más severa de desgaste en materiales dúctiles, la punta abrasiva corta el material y a la vez desplaza una pequeña porción del mismo. Dependiendo del ángulo de acción de la partícula cortante, puede presentarse la transición de formación de surcos al corte, siempre que se tenga la posición o el ángulo crítico, por ejemplo,  $\theta = 45$  en el caso del cobre y  $\theta = 85$  para el aluminio.

Los mecanismos de formación de surcos, creación de brechas y el corte de materiales dúctiles, se aprecian en la **Figura 2.8**.

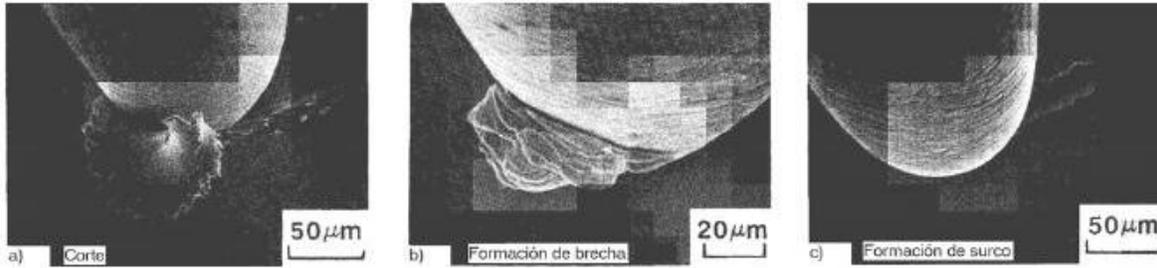


Figura 2.8. Desgaste en materiales dúctiles: a) Corte, b) Formación de brecha y c) Formación de surcos.

La microfractura, es otra forma de desgaste abrasivo de los materiales quebradizos y, ocurre cuando se rebasan los esfuerzos de fractura de la superficie del material, aplicadas por el grano abrasivo.

### 2.2.2.1 INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE LAS PARTICULAS EN EL DESGASTE ABRASIVO [7]

Las partículas abrasivas tienen un tamaño que oscila entre 5 y 50  $\mu\text{m}$  de tamaño. Estudios realizados en laboratorios, muestran el comportamiento de las mismas en el proceso de abrasión y erosión en los metales, de acuerdo a la **Figura 2.9**. En ella, se tiene que para partículas más pequeñas de 100  $\mu\text{m}$ , las tasas de desgaste caen drásticamente. Desde luego que el comportamiento difiere para partículas de diferentes materiales y diferentes metales. En la mayoría de las aplicaciones, el comportamiento observado en estos procesos de desgaste, resulta del reflejo del efecto verdadero del tamaño de la partícula debido al esfuerzo sobre el metal mismo, sobre todo durante experimentos de indentación y rompimiento. En la Figura 2.19, se tiene el comportamiento del cobre, donde se involucra también flujo plástico. Además, se observa que el desgaste en los materiales frágiles puede involucrar fractura, exhibiendo gran dependencia en la tasa de desgaste, sobre todo en el tamaño de las partículas utilizadas durante la experimentación.

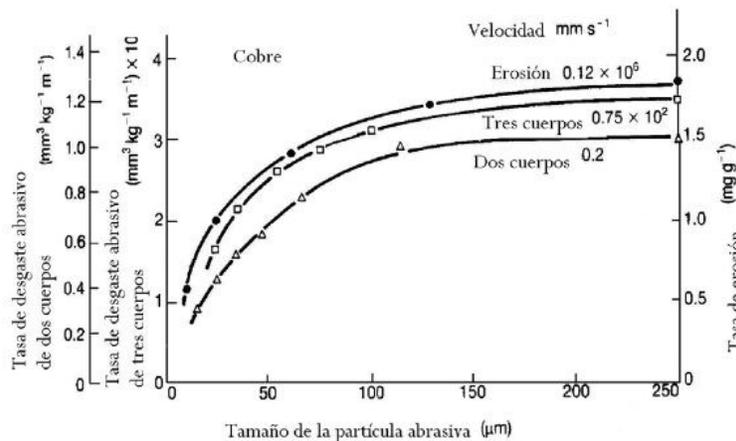


Figura 2.9 Tasas de desgaste del cobre bajo condiciones de desgaste abrasivo de dos cuerpos, tres cuerpos y erosión, por efecto de partículas de SiC de diferentes tamaños.

Aparentemente, el daño que ocasionen las partículas, se encuentra en proporción a su tamaño, sin embargo, durante el proceso de abrasión, incluso se pueden remover partículas grandes con partículas más pequeñas.

### 2.2.2.2 INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES EN EL DESGASTE ABRASIVO

En el proceso de desgaste abrasivo, las propiedades físicas y químicas de los materiales tienen marcada influencia, según lo ilustra la **Figura 2.10**. Algunas de ellas son: dureza, módulo elástico, resistencia de cedencia, temperatura de fusión, estructura cristalina, microestructura y la composición.

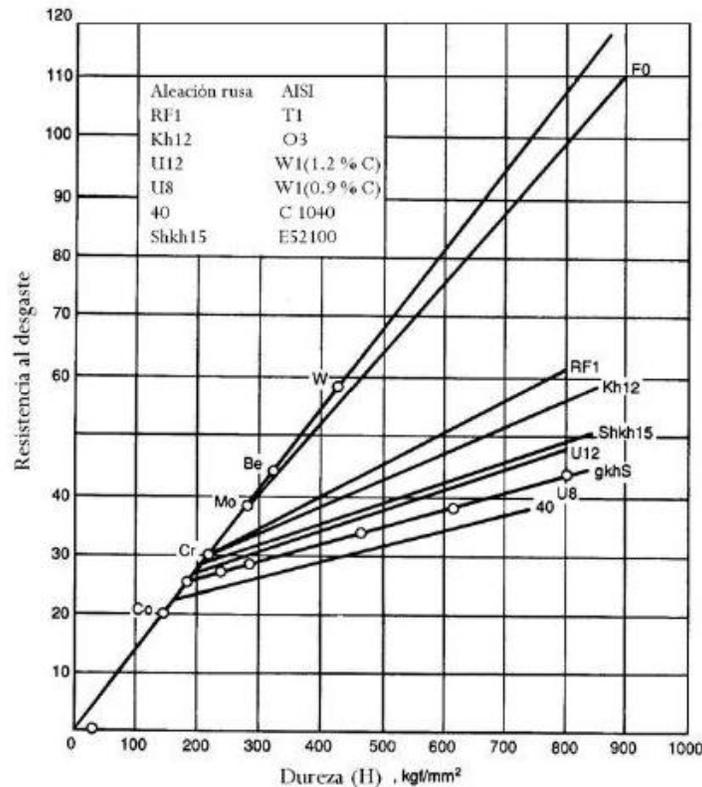


Figura 2.10 Resistencia al desgaste contra dureza en metales puros y aleaciones.

Krushchov [8], experimentó una serie de pruebas, como se muestra en la Figura 2.20. Encontró que en los materiales puros, existe una relación formal entre la tasa de desgaste y la dureza.

En los ceros en esa misma gráfica, con pendiente diferente, la dureza es inversamente lineal con respecto al desgaste abrasivo.

La orientación y la estructura cristalina también son propiedades determinantes en la forma de presentarse el desgaste abrasivo. De acuerdo a Allison, en metales con estructura cúbica, el desgaste es dos veces mayor a la tasa de desgaste de los hexagonales.

Por otra parte, la microestructura define el grado de desgaste abrasivo que presenta un material, por ejemplo, la austenita y la bainita de igual dureza es mucho más resistente que la ferrita, perlita o martensita.

El uso de aleaciones e intersticios, como la adición de carbono al acero, le proporciona ventajas de resistencia al desgaste abrasivo. La creación de una segunda fase modifica para bien las propiedades del material en cuanto a la dureza y resistencia a la cedencia, como sucede en: precipitaciones o partículas como los carburos.

### 2.2.2.3 INFLUENCIA DE LOS EFECTOS AMBIENTALES EN EL DESGASTE ABRASIVO

Los efectos ambientales actúan directamente sobre el desgaste abrasivo de los materiales incrementando la pérdida de material. A medida que se incrementa la temperatura, la tasa de desgaste se incrementa debido a que decrecen dureza y esfuerzo de cedencia.

Por ejemplo, en el caso del aluminio y el cobre, cuando la temperatura se eleva desde el ambiente hasta 673 °K se observa un pequeño incremento en su tasa de desgaste, sobre todo debido a que durante la abrasión, pequeñas áreas son calentadas adiabáticamente.

El aumento de la velocidad de 0 a 2.5 m/s incrementa significativamente la tasa de desgaste abrasivo, se puede considerar que posiblemente se deba al aumento de temperatura, ocasionado por el calor de fricción.

Siguiendo la ecuación de Archad, sabemos que el desgaste abrasivo es proporcional a la carga aplicada, siempre que no se rebase el valor y llegue a fracturar las partículas abrasivas. Cuando ocurre lo anterior, se generan nuevas partículas cortantes, mismas que incrementan el desgaste abrasivo.

La humedad y los gases corrosivos existentes en el medio ambiente tienen una influencia marcada sobre el desgaste abrasivo. En los sitios de trabajo de las máquinas o durante las pruebas de desgaste, se debe de contar con atmósferas limpias y de preferencia con valores de pH pequeños. La abrasión crea constantemente superficies nuevas que se corroen rápidamente e inmediatamente después, dichas capas se remueven por la acción de la abrasión.

### 2.2.2.4 DESGASTE ABRASIVO DEBIDO AL MAQUINADO [6]

Desgaste que se produce cuando se desliza sobre una superficie suave otra superficie que contiene asperezas duras. Estas asperezas, producen sobre la superficie blanda, ralladuras y cortes a lo largo de la trayectoria del deslizamiento. El material desprendido, en forma de residuos y virutas posteriormente genera desgaste. Para ilustrar este tipo de desgaste, lo más típico es cuando una superficie de acero endurecido con un mal acabado se desliza sobre una superficie de bronce. El resultado es que se produce una alta tasa de desgaste con apariencia de marcado y con ranuras presentes, como se ilustra en la **Figura 2.11**.

Los granos abrasivos duros generados por residuos de desgaste en superficies de igual dureza, pueden incrustarse en cualquiera o en ambas superficies de deslizamiento, formando puntas de corte. Por otra parte, cuando las superficies son de dureza diferente, la

tendencia es que las partículas duras se incrustan en el material más suave, causándole daño superficial, y en consecuencia, desgaste.

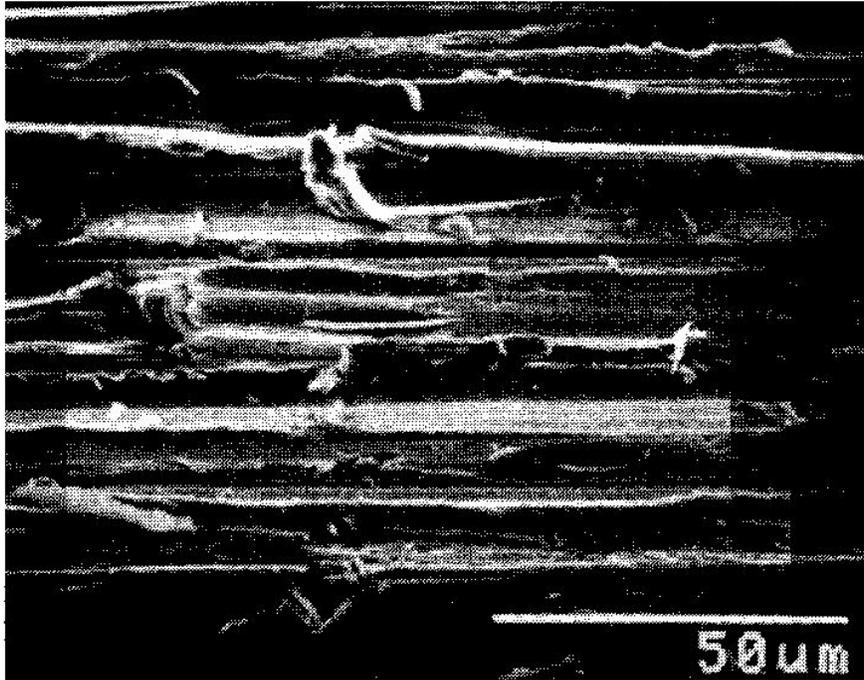


Figura 2.11 Desgaste abrasivo de la superficie de un acero 1020, lijado con SiC. La superficie presenta características de ranurado, en forma de surcos e incrustaciones.

Generalmente, del par de deslizamiento en experimentación, resulta mucho más práctico reemplazar el material que tiene menor resistencia al desgaste.

#### 2.2.2.5 DESGASTE ABRASIVO POR FRACTURA FRÁGIL

El desgaste abrasivo por fractura frágil, ocurre cuando dos materiales sin que lleguen a tener gran impacto, ya sea por la acción de corte o de rayado. En materiales para herramientas manuales es muy común este tipo de desgaste; puede presentarse por la presencia de hilos y fibras e inclusive por la influencia de algún medio semisólido que presiona las partículas abrasivas de desgaste hacia las superficies opuestas de los materiales. Si las partículas de desgaste son muy finas, la apariencia del desgaste sólo se manifiesta como un pulido, mientras que si son grandes, la apariencia es un rallado visible. Una característica básica que ayuda a disminuir este tipo de desgaste es la dureza de los materiales. En la **Figura 2.12**, se aprecia lo que ocurre con metales puros y con tratamientos térmicos sometidos al desgaste por la acción de partículas duras. De acuerdo a las trayectorias trazadas, es claro que la resistencia al desgaste abrasivo se incrementa de manera lineal con respecto a la dureza de los materiales.

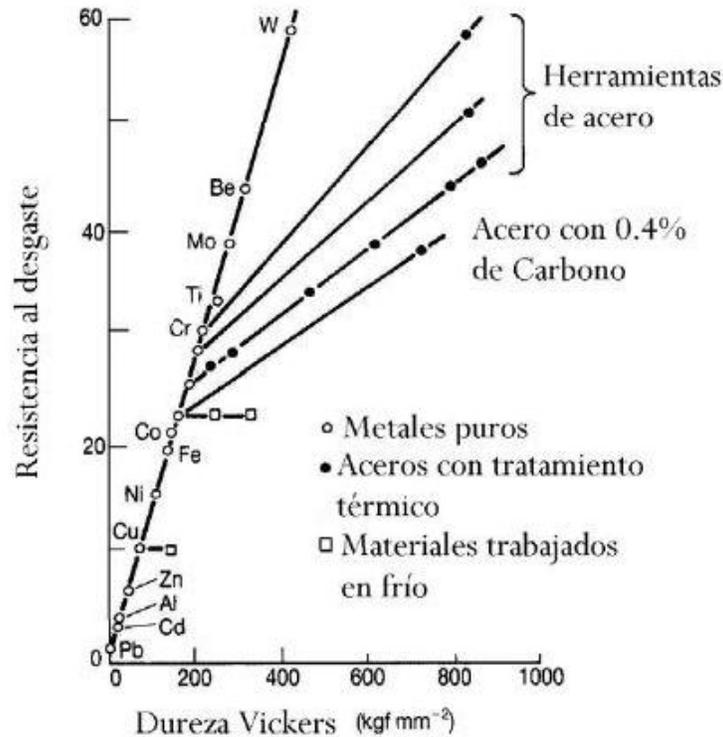


Figura 2.12 Resistencia al desgaste para: a) Metales puros (círculo claro), metales con tratamiento térmico (círculo oscuro) y aceros endurecidos por trabajo (cuadro). Las pruebas se realizaron en condiciones de abrasión de dos cuerpos, graficada contra dureza de indentación.

Cuando la microestructura de los materiales es más compleja, por ejemplo, en los aceros con tratamiento para endurecerlos, su resistencia a la abrasión es menor que la obtenida para los metales puros o de metales tratados con dureza equivalente.

En la **Figura 2.22**, se presenta también la resistencia al desgaste abrasivo de bajo esfuerzo en materiales que han tenido un trabajo de endurecimiento en frío.

La amplia disposición de materiales que pueden seleccionarse para resistir al desgaste generado por fractura frágil es ilimitada, pero se debe de tener presente que es importante considerar la dureza abrasiva, y las condiciones de operación y del medio ambiente circundante.

#### 2.2.2.6 DESGASTE DE EROSION POR IMPACTO DE PARTICULAS

Desgaste de tipo abrasivo que se presenta cuando un vapor, líquido o gas, que transporta partículas cortantes, causa daño sobre las superficies. A este tipo de desgaste tan característico, se le denomina desgaste por impacto de partículas. En las **Figuras 2.13, 2.14 y 2.15**, se presentan ilustraciones típicas de este desgaste, en situaciones diferentes.

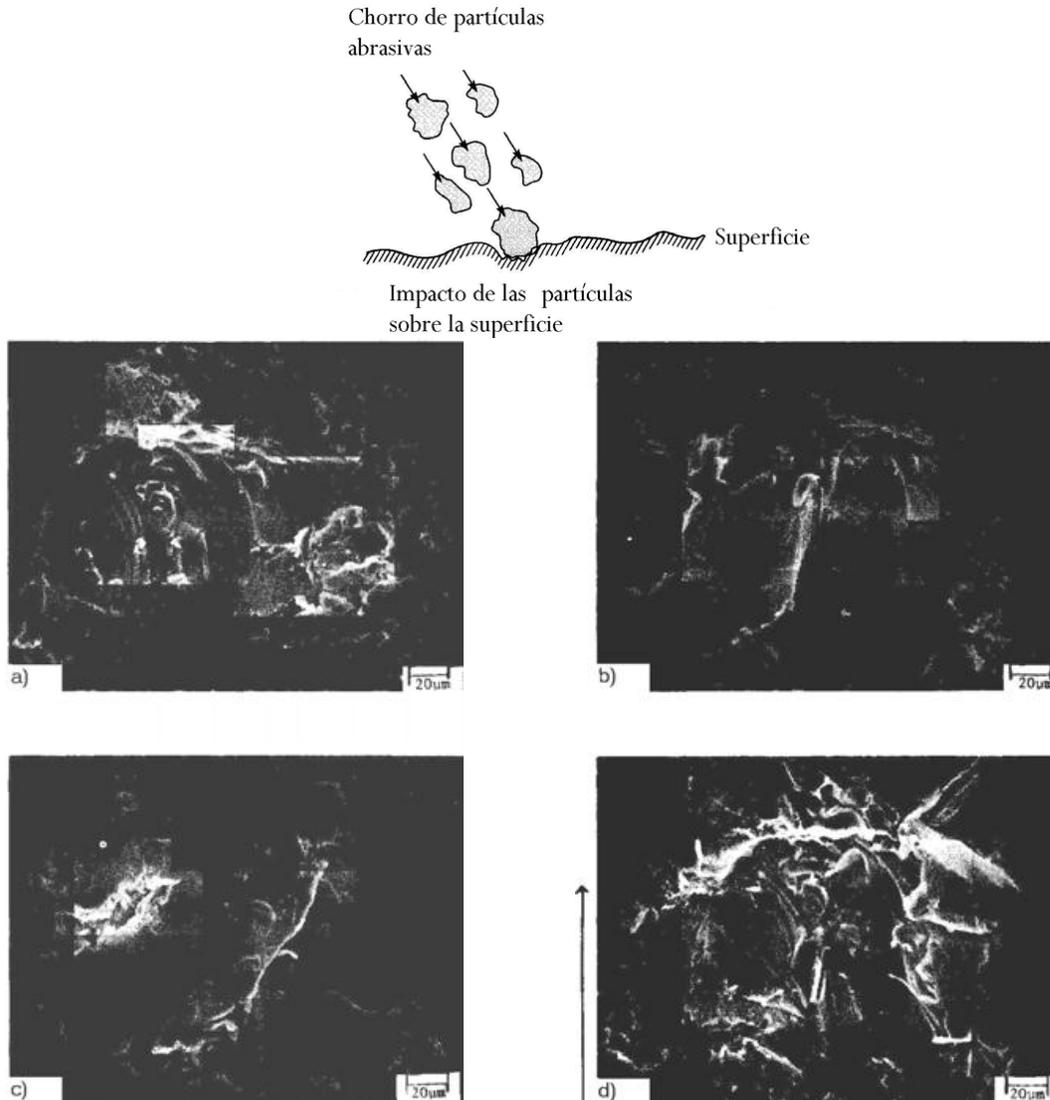


Figura 2.13 Estas micrografías muestran la secuencia de la erosión que le ocasionó el SiC con ángulo de incidencia de 30° sobre al aluminio 7075-T6. La velocidad de las partículas se proyectó a una velocidad de 30.5 m/s en la dirección que indica la flecha del dibujo.

El desgaste ocurre cuando las partículas cortantes golpean sobre la superficie con un ángulo agudo, ocasionando daños en forma de corte de tamaño micrométrico, que se manifiesta por un marcado y desprendimiento de material en el sentido del flujo del fluido.

Para disminuir este fenómeno se debe utilizar materiales de gran dureza. Para ángulos pequeños de impacto, donde el choque es poco probable, se utilizan materiales quebradizos, siempre y cuando la velocidad de la partícula no sea grande. Según el ángulo de impacto, se presentan diferentes cantidades de desgaste de corte y de fractura, o incluso puede suceder que ambos se manifiesten simultáneamente. Pequeñas gotitas de líquido a alta velocidad, como en el caso de los extremos de los alabes de las turbinas de vapor pueden sufrir desgaste causando deformación por fractura.

En materiales dúctiles, el daño que se causa debido a repetidos impactos con ángulos grandes propios para causar daño, se presenta en forma de partículas de desgaste causando deformación y fatiga. En tanto que, en materiales quebradizos, la tendencia es a presentar rompimientos de tamaño micrométrico. A altas velocidades también los impactos se pueden notar en forma de evidentes picaduras entre la superficie deforme y rugosa.

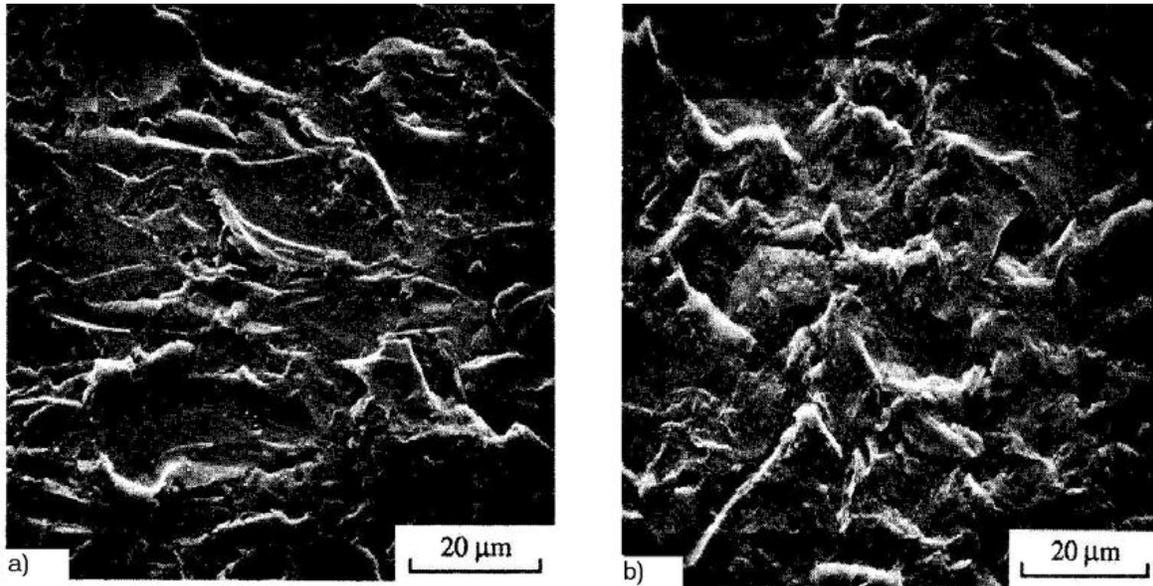


Figura 2.14 Superficie típica de un material comercial dúctil (níquel) sometido a erosión por impacto de partículas de  $Al_2O_3$  de  $130\ \mu m$  de tamaño y velocidad de  $53.8\ m/s$ . La erosión se realizó a dos diferentes ángulos de incidencia a)  $20^\circ$  y b)  $90^\circ$ .

Los materiales pueden resistir al desgaste erosivo ocasionado con ángulos de alto impacto antes de sufrir fractura, siempre y cuando su estructura sea capaz de absorber cierta cantidad de energía. Cuando el impacto angular es grande, los materiales dúctiles duros son más resistentes que los materiales quebradizos duros.

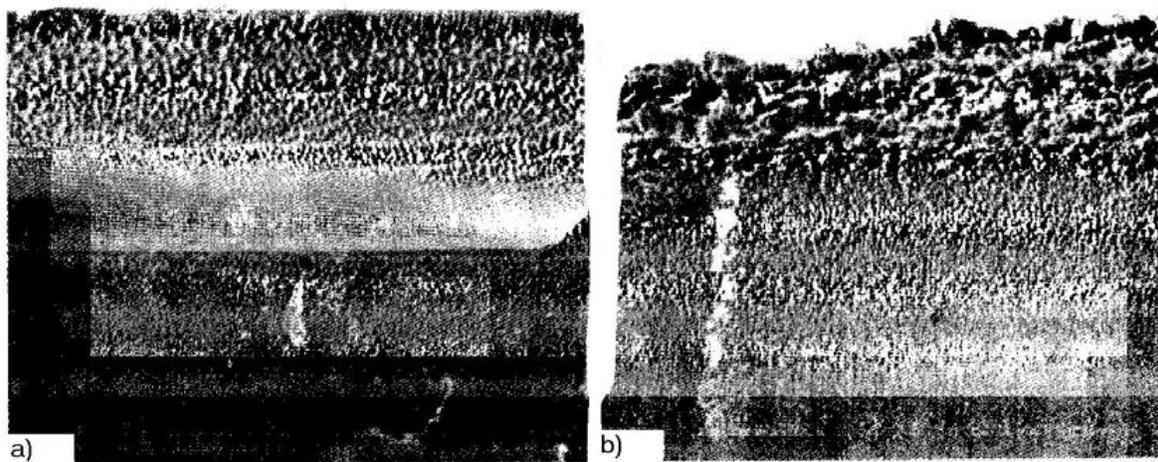


Figura 2.15 Porciones de alabe de turbina de vapor de acero inoxidable 403, con erosión por impacto. Porción a) Recubierta en su extremo por una capa protectora de Stellite 6B, porción b) No se protegió con nada.

En la **figura 2.16**, se presenta la influencia del ángulo de impacto de las partículas abrasivas sobre la tasa de desgaste de los materiales.

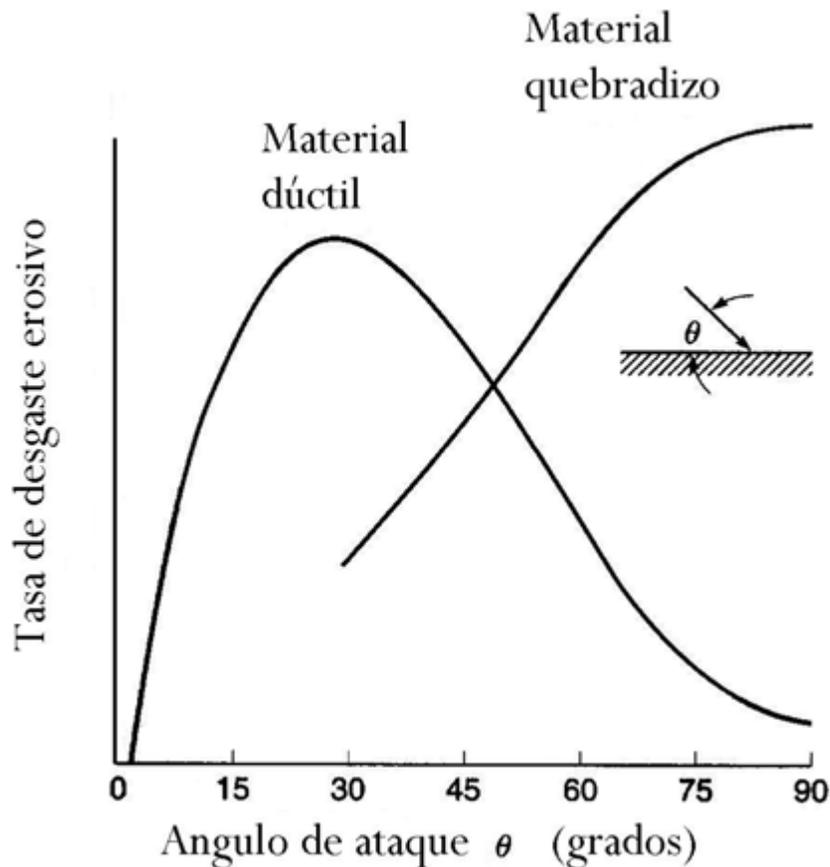


Figura 2.16 Influencia del ángulo de ataque en la tasa de desgaste abrasivo de los materiales.

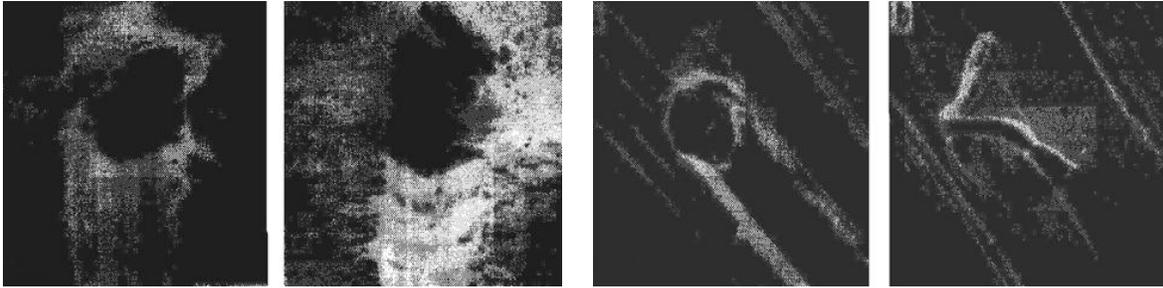
#### 2.2.2.7 DESGASTE ABRASIVO DE TRES CUERPOS [8]

Este tipo de desgaste ocurre cuando entre las superficies deslizantes encuentran o caen partículas abrasivas de tamaño muy pequeño. Son varios los factores de los cuales depende, como la resistencia a la fractura, tamaño de las partículas, dureza y rugosidad de las superficies y el tipo de movimiento presente.

La presencia de partículas duras entre dos materiales suaves de deslizamiento, se corre el riesgo de que se invierta el tipo de desgaste a desgaste de dos cuerpos, debido a la permanente incrustación de las partículas duras en los materiales suaves. Otras veces, cuando las partículas no son muy duras, o son menos duras que las superficies de deslizamiento, éstas solo se incrustan de manera temporal en las superficies. Sin embargo, cuando inicia el giro se liberan y la tasa de desgaste es relativamente menor. Cuando la rugosidad es mayor que el tamaño de las partículas, se ocasiona un desgaste insignificante. En particular, existe un tipo de desgaste abrasivo de tres cuerpos que ocurre en condiciones de esfuerzos grandes, donde los granos de abrasión se encuentran aglomerados. Este

desgaste se denomina abrasión de esmerilado. En los molinos y en las superficies deslizantes o rodantes que operan a condiciones críticas ocurre este tipo de desgaste. En superficies suaves, en este caso presentan fisuras de corta profundidad, ranuras y abolladuras. Las partículas antes de ser fracturadas tienen poca oportunidad de evitar ser enrolladas antes de que ocurra la fractura.

Este tipo de desgaste aprecia en la **Figura 2.17**, donde los daños que lo ocasionan son partículas duras, residuos y virutas.



*Figura 2.17 Ejemplos de desgaste abrasivo de tres cuerpos.*

En materiales suaves, probablemente cause daños de fatiga, mientras que en los materiales frágiles ocurre un corte micrométrico y un desprendimiento.

El desgaste abrasivo de esmerilado puede ser disminuido evitando la abolladura y el rompimiento mediante la combinación de dureza y rugosidad adecuadas en las superficies actuantes

#### 2.2.2.8 DESGASTE ABRASIVO POR RANURADO

Desgaste que ocurre cuando rocas de cuarzo o material abrasivo tienen interacción con una superficie, de la cual se desprenden partículas abrasivas relativamente grandes. Cuando se encuentran involucradas dos superficies metálicas, la superficie que produce la carga sobre los fragmentos abrasivos no interactúa con la otra superficie. Este tipo de desgaste se presenta a grandes y pequeñas velocidades. La apariencia que adquieren las superficies es en forma de surcos profundos.

Dependiendo de la forma cortante que adquieran las partículas y de las propiedades del material, el mecanismo de remoción involucra deformación, corte o astillado, así como remoción de metal por la formación de ranuras en una escala tan grande comparada al que, microestructuralmente se produce por excoiación.

El manganeso austenítico ha sido utilizado en componentes y como recubrimiento para resistir el desgaste abrasivo de excavación con impactos. Además posee una combinación de alta resistencia y dureza después de someterse a endurecimiento por trabajo. En condiciones de impactos no tan severos, existe una gran variedad de materiales que reúnen

las propiedades de dureza y resistencia a diferentes relaciones, los compuestos de carburo de tungsteno y los hierros principalmente. Las capas y recubrimientos delgados, depositados sobre las superficies de los materiales son insuficientes para reducir este tipo de desgaste, debido a que el tamaño, relativamente grande de las partículas abrasivas causan excavación y desprendimiento del material.

### 2.2.2.9 RECUBRIMIENTOS PARA DISMINUIR EL DESGASTE ABRASIVO

El avance tecnológico en la producción de ciertos materiales a los que se les aplica recubrimientos especiales con el fin de reducir el desgaste, es amplio. Algunos de ellos, se encuentran sujetos a múltiples factores que influyen en el proceso de desgaste como son: orientación y tamaño del grano, módulo de elasticidad, dureza relativa y lo quebradizo de la segunda fase del material.

El modelo de Zum Gahr, de la **Figura 2.18**, muestra el comportamiento del material al variar estos efectos.

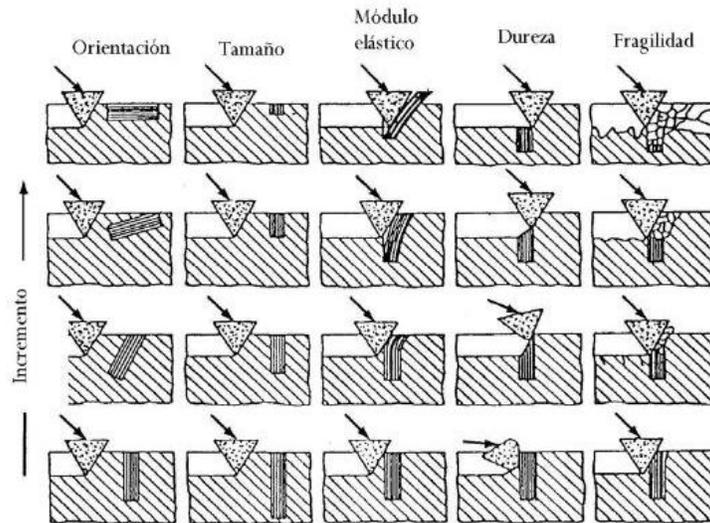


Figura 2.18 Efectos de la orientación, tamaño, módulo elástico, dureza y fragilidad de los recubrimientos sobre la resistencia al desgaste abrasivo.

Se prefiere que la colocación de una segunda fase sea anclada de forma perpendicular a la superficie, puesto que en esta resulta más difícil removerla contra una posición paralela. El tamaño del grano en la segunda fase debe ser mayor a la profundidad del canal que genera el abrasivo. Además, debe de contar con un módulo de elasticidad mayor, dureza superior y ser menos quebradizo.

### 2.2.3 DESGASTE POR FATIGA

Se presenta en superficies que son sometidas a cargas de contacto y con fluctuaciones de tiempo prolongado. Aparentemente, por principio no se notan daños significativos, pero en realidad la resistencia del material en sus capas inmediatas a la superficie, cede, presentando formas de rompimiento con valores por debajo de la resistencia del material.

Típicamente los daños por fatiga se conducen siguiendo el siguiente orden.

- Transmisión del esfuerzo a los puntos de contacto.
- Crece la deformación plástica en cada ciclo.
- Debajo de la superficie se producen huecos que se rompen.
- Se forma el rompimiento e inicia su propagación del mismo.
- Se crean las partículas de desgaste, conocidas como “debris”.

La distribución de los esfuerzos, así su continuidad e incremento de los mismos, van a determinar la forma y la propagación de los rompimientos en los materiales. Cuando se tienen cargas concentradas, la propagación y el curso de la fatiga es una curva, que se inicia en la superficie y se dirige hacia el interior del material. El daño en la superficie se manifiesta en forma de hoyos o cavidades con fondo liso. Una vez iniciada la formación de tales cavidades, solo se pueden interrumpir si se incrementa la dureza del material.

Debido al endurecimiento por trabajo o reduciendo los esfuerzos, una vez que haya sido detectado su origen. Los niveles de esfuerzos aplicados, la dureza del material (carburizado, nitrurizados, tratamientos térmicos), y el cuidado de su selección son factores que deben considerarse para evitar en lo posible el desgaste por fatiga.

Cuando se tienen gradientes de dureza severos o si las capas de recubrimiento son muy delgadas, entonces se presenta el desgaste por fatiga y se propaga rápidamente entre la frontera de la superficie y la de los planos moleculares inmediatos.

La fatiga térmica, se presenta en materiales no dúctiles y de conductibilidad térmica pobre. Las fluctuaciones de gradiente de temperatura son determinantes, ya sea en las expansiones y en las contracciones de los materiales. Dependiendo del origen, algunas veces la fatiga de superficies es generado por el efecto de alteraciones producidas por los esfuerzos.

### 2.2.3.1 DESGASTE DE PERCUSIÓN

Si la acción de un fuerte impacto de una superficie sobre otra, rebasa el límite de resistencia de la segunda superficie; en consecuencia se genera un desgaste percusivo en forma de fractura o rompimiento. En cambio, si el impacto se encuentra por debajo del punto de cedencia, se requieren impactos sucesivos para que el material solo sufra deformaciones, hasta alcanzar su grado máximo, antes de que ocurra su rompimiento.

El rompimiento y desgaste de la superficie de un material se puede disminuir, al aumentar su resistencia de cedencia debida al endurecimiento por trabajo durante la deformación plástica, debiendo estar por encima del valor de los impactos aplicados.

Se deben usar materiales con alta resistencia mecánica cuando se desea prevenir ya sea la deformación y el rompimiento, en los casos donde los impactos sobre los materiales, sean ligeros.

La combinación de un sustrato suave con recubrimiento blando aumenta su resistencia. Aunque es susceptible de sufrir deformaciones plásticas en las zonas donde se concentran los esfuerzos. Sin embargo, éstos pueden ser absorbidos si el sustrato es mucho más blando, pero si el área endurecida expuesta es amplia, la concentración de esfuerzos es más dominante.

### 2.2.3.2 CAVITACIÓN

Tipo de desgaste que ocurre en componentes hidráulicos. La superficie afectada presenta picaduras, acompañadas de corrosión debida a los líquidos que circulan. Durante su manejo, se forman bolsas y burbujas, que comienzan a ebullir debido a que la presión del líquido es menor a la presión de vapor. Al fluir las burbujas a regiones de alta presión, se colapsan e impactan en la superficies de los materiales cuando se encuentran cerca o en la frontera de los mismos. Para evitar la erosión por cavitación, se recomienda el uso de materiales a base de aleaciones de cobalto, titanio, hierro, cobre y de níquel. Algunos recubrimientos también la resisten.

#### 2.2.3.2.1 EROSION POR CAVITACIÓN

Es el mecanismo de degradación de los materiales que es causada por cavitación en líquidos. El daño sobre una superficie sólida que se debe a este tipo de desgaste es ocasionado por el colapso asimétrico de cavidades que se encuentran cerca de la misma. Los colapsos asimétricos, resultan de micro partículas líquidas que son lanzadas directamente sobre la superficie sólida. Las cargas mecánicas están bien localizadas, debido a que la coordinación del colapso se agrupa en la cavidad, pudiendo ser extremadamente severa, lo que da como resultado una deformación en la superficie. La eventual repetición de las cargas, remueve material de la superficie, dando lugar a la erosión.

El efecto depende de varios factores como son: presión hidrostática, tamaño de la cavidad, distancia individual entre cavidades en la superficie sólida y su distribución, temperatura y densidad del líquido.

El impacto de la energía se absorbe en el material sólido como una deformación que puede ser elástica, plástica o en forma de fractura. En particular, la erosión se presenta en forma de pérdida de masa de la superficie, y en la mayoría de los materiales, sometidos a estas condiciones, la cavitación se manifiestan por un periodo de incubación, durante el cual sufren las deformaciones mencionadas.

La deformación de los metales y sus aleaciones, están influenciadas marcadamente por su estructura cristalina. Las tasas de desgaste se manifiestan por guardar relación por los periodos de tiempo de exposición de los materiales. En la **Figura 2.19** y en la **Figura 2.20**, se muestran diferentes situaciones de los daños debidos al efecto de erosión por cavitación.

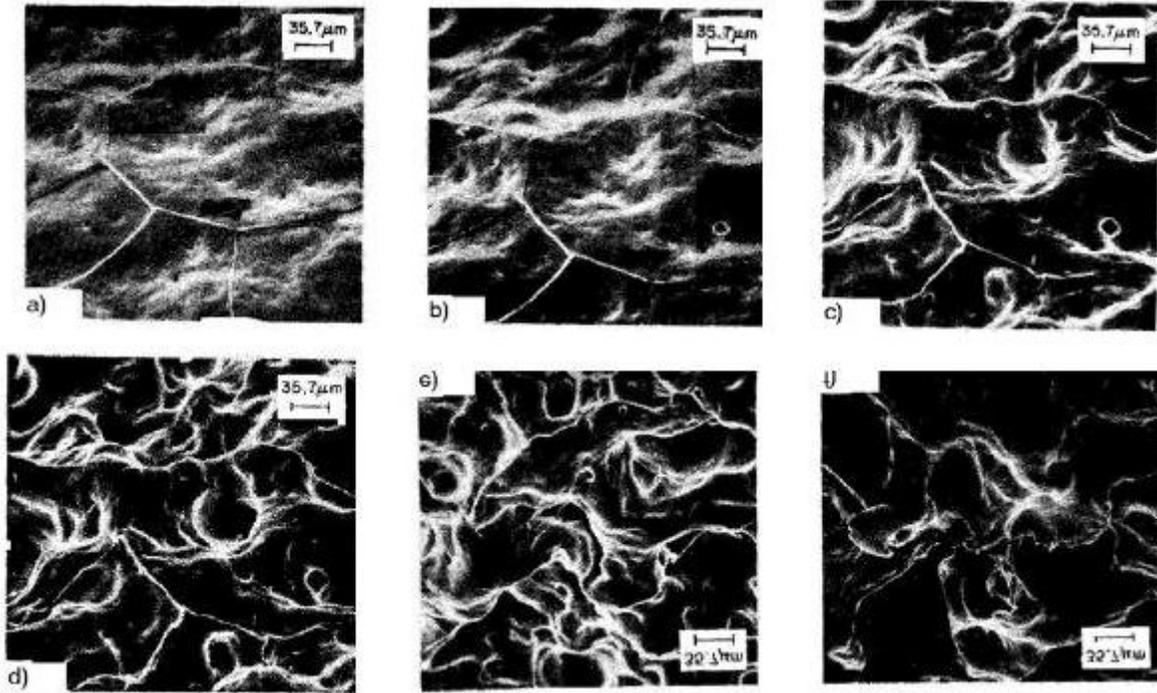


Figura 2.19 Aluminio policristalino expuesto a cavitación por vibración durante diferentes periodos de tiempo: a) 12 s, b) 24 s, c) 40 s, d) 60 s, e) 75 s y f) 90 s.

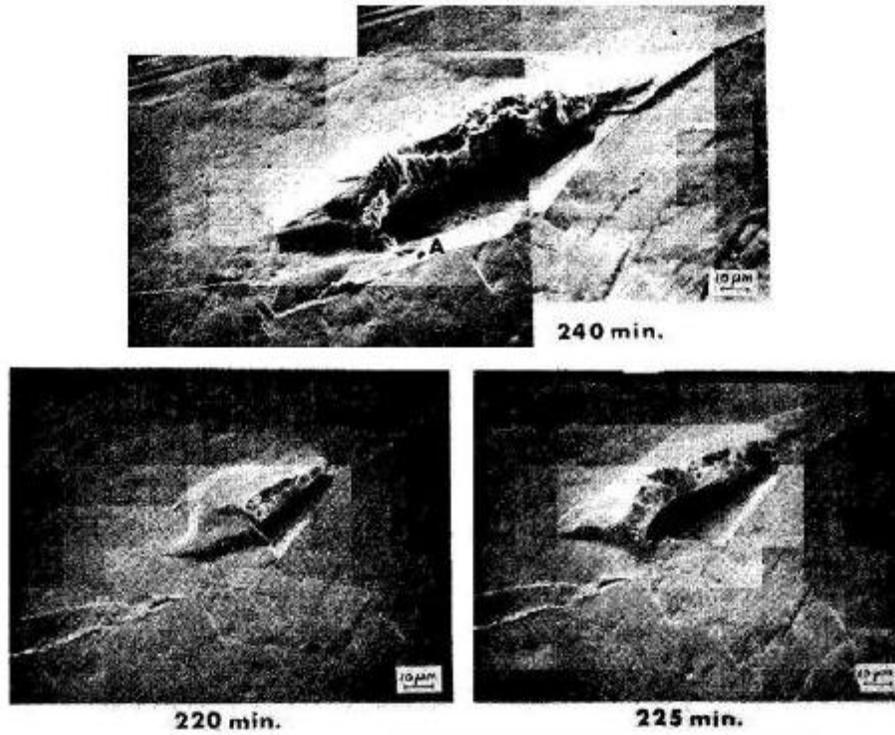
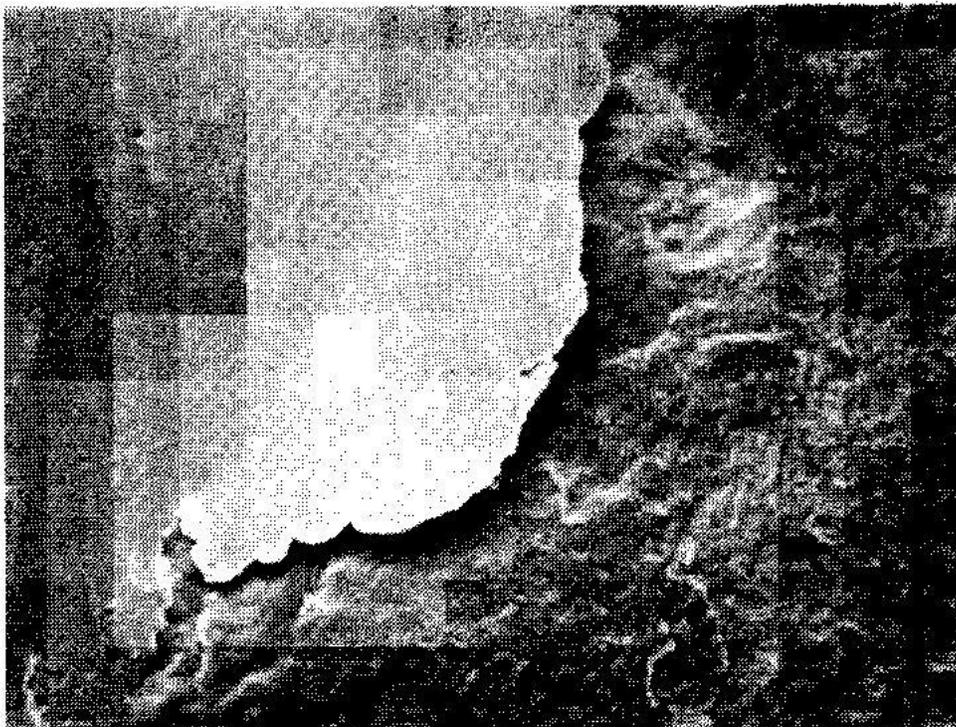


Figura 2.20 Fractura quebradiza en hierro puro ocasionada por cavitación por vibración.

### 2.2.3.3 DESGASTE POR DELAMINACION

Este tipo de desgaste se presenta simultáneamente con otros tipos de desgaste como el adhesivo y el abrasivo, aunque en el caso de éste último, aún se encuentra en discusión su presencia. A veces puede ser considerado como un tipo de desgaste donde el mecanismo básico en el cual se presenta es la fatiga. Se caracteriza por el desprendimiento de pequeñas hojas o residuos de material de desgaste.

Por efecto repetido de las cargas normal y de tracción, se manifiesta inicialmente como una deformación y rompimiento en la superficie. Se compacta la capa de óxido, posteriormente los granos sufren una severa deformación, los cuales son unidos y orientados. Finalmente se presenta una deformación plástica, como se presenta en la **Figura 2.21**, que concluye cuando el estado de los residuos de desgaste toman una configuración como de hojuelas.



*Figura 2.21 Desgaste típico por delaminación producido por contacto entre metales.*

*El aspecto estructural y la densidad, así como el tipo y las fases dispersantes de los materiales son característicos que determinan la tasa de desgaste por delaminación. Materiales con segunda fase sin enlace y los materiales porosos o con inclusiones, son los que presentan este tipo de desgaste con mayor probabilidad. Por otra parte, los materiales con una sola fase que presentan endurecimiento y los de partículas con enlace de segunda fase, lo resisten.*

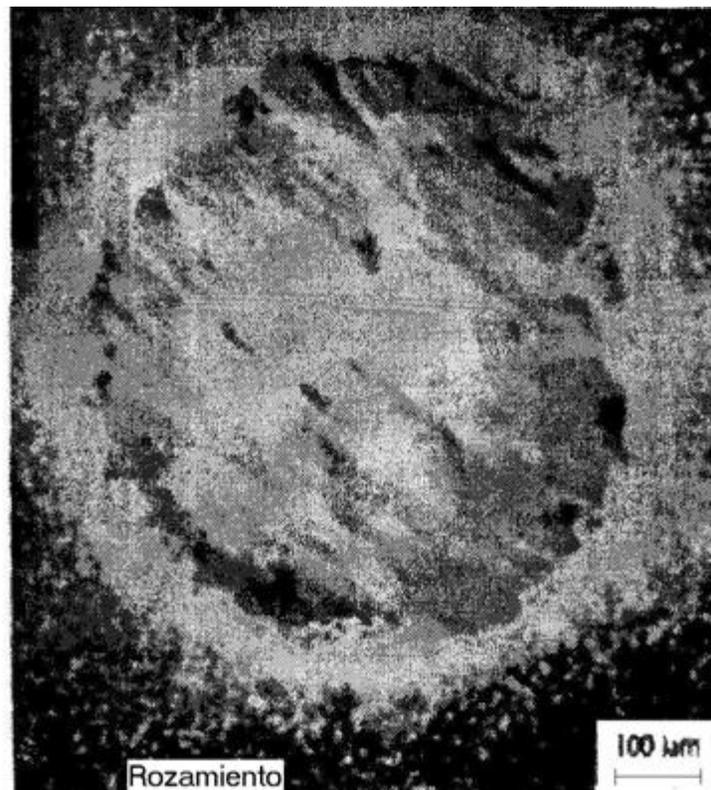
### 2.2.4 DESGASTE COMBINADO

Muchas veces el proceso de desgaste se manifiesta de dos o más formas. Las características que presentan son totalmente diferentes a las descritas con anterioridad.

#### 2.2.4.1 DESGASTE DEBIDO AL MOVIMIENTO OSCILATORIO DE PEQUEÑA AMPLITUD “FRETTING” [5]

Cuando dos superficies con movimiento relativo experimentan además un movimiento oscilatorio de muy baja intensidad, en su superficie se presenta el desgaste denominado como “fretting”, y causa daño severo. Se caracteriza por producir residuos de óxido muy finos que fluyen hacia el área de contacto, en donde se manifiesta en forma de picaduras de poca profundidad. En [la Figura 2.22](#), se muestra el cambio superficial de la topografía del material cuando ha experimentado este tipo de desgaste.

Se cree que las partículas de tamaño pequeño, se generan por desgaste adhesivo, y se oxidan posteriormente; así, cuando quedan atrapadas entre la oscilación de las superficies, se produce una elevada tasa de desgaste abrasivo. Alternativamente, se supone que la reacción de la superficie con fatiga se acelera por la presencia de oxígeno como responsable de la corrosión.



*Figura 2.22 Topografía de una superficie que ha experimentado desgaste por rozamiento.*

Una buena selección de materiales, de preferencia aquellos a los que se les ha realizado un tratamiento térmico, termoquímico o depositado algún recubrimiento, conduce a reducir el proceso de desgaste debido al rozamiento. Los recubrimientos sobre superficies blandas en un elemento es muy benéfico, aunque siempre es preferible el empleo de materiales diferentes. El endurecimiento de superficies metálicas como el nitrurizado, cromado duro, deposición de plasma sobre superficies son adecuados para resistir a la fatiga. El aluminio y el titanio pueden ser anodizados para resistir el desgaste por “fretting”.

#### 2.2.4.2 DESGASTE CORROSIVO

Proceso de desgaste que se caracteriza por la acción de sustancias químicas como el oxígeno y otras moléculas que son adsorbidas por las superficies limpias de los metales, formando fuertes enlaces con ellas mismas. Tales sustancias reaccionan con la superficie y producen efectos no deseables.

Durante el deslizamiento de materiales metálicos, en la interfase se producen contactos con las asperezas presentes y cuando no existe lubricación entre dichas superficies, se produce una oxidación térmica que produce algunas partículas muy pequeñas de óxido. Esta oxidación tribológica generalmente beneficia al proceso de corrosión, reduciendo la tasa de desgaste del par metálico hasta dos veces su magnitud, comparado con la que le produce a condiciones de atmósfera inerte.

Cuando la temperatura es baja, la oxidación se produce por el calor generado por el contacto entre asperezas, en tanto que a elevadas temperaturas ocurre en toda la superficie y genera desgaste.

Debido a que se encuentran protegidos por una delgada película de óxido, la mayoría de los materiales son parcialmente resistentes a la corrosión. En condiciones de desgaste, la capa es removida por interacción mecánica, exponiendo al material de manera continua al medio en que opera. Dado que los medios son generalmente corrosivos, la tasa de pérdida de material se acelera por los efectos químicos a un grado mayor que cuando solo se tiene el desgaste debido a medios ambientales.

El desgaste químico que se presenta donde existe la presencia del aire, se le denomina también desgaste oxidativo. Si las superficies presentan valores mayores de rugosidad, ésta favorece las reacciones químicas y aumentan en consecuencia, el desgaste corrosivo.

Cuando el par de materiales es de acero, la presencia del óxido predominante depende de la velocidad de deslizamiento. A bajas velocidades y temperatura ambiente, el óxido predominante es  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, en condiciones intermedias es Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> y a altas velocidades y temperaturas es FeO.

Por ejemplo, en motores diesel aparte de que se presenta el desgaste por escufinado, el desgaste de corrosión es elevado por el alto contenido de azufre en el combustible, presentándose en consecuencia, el proceso de desgaste abrasivo de forma severa.

La relación que guarda el desgaste corrosivo con la tribología es muy simple. Ocurre cuando existe deslizamiento entre dos superficies, donde la fricción que se produce, modifica la cinética de las reacciones químicas que se presentan por el efecto de los líquidos y gases presentes en el ambiente.

Los cambios químicos que alteran el comportamiento de las reacciones químicas sobre las superficies por el efecto de la fricción o de la energía mecánica se le denomina triboquímica. Asimismo, al control de desgaste por la misma reacción, se le designa con el

nombre de desgaste triboquímico. Como es de suponerse, el mecanismo obvio por el cual se incrementa por el cual se incrementa la tasa de reacción química es el calor que se produce por el contacto entre asperezas.

Al existir interacción química en las interfases de los materiales, se produce la corrosión. Generalmente, ésta se manifiesta en medios corrosivos elevados, con altas temperaturas y donde el contenido de humedad es significativo. Cerca de la costa, la operación de la maquinaria se ve afectada más rápidamente por la corrosión en comparación de aquella que se encuentra en ambientes más limpios.

CAPÍTULO III  
ENSAYOS DE  
DESGASTE Y  
DETERMINACIÓN DE  
COEFICIENTES  
TRIBOLÓGICOS

---

### **EQUIPO UTILIZADO:**

Máquina de desgaste por abrasión AMSLER

Capacidad 150 Kg/cm

Eléctrica motorizada.

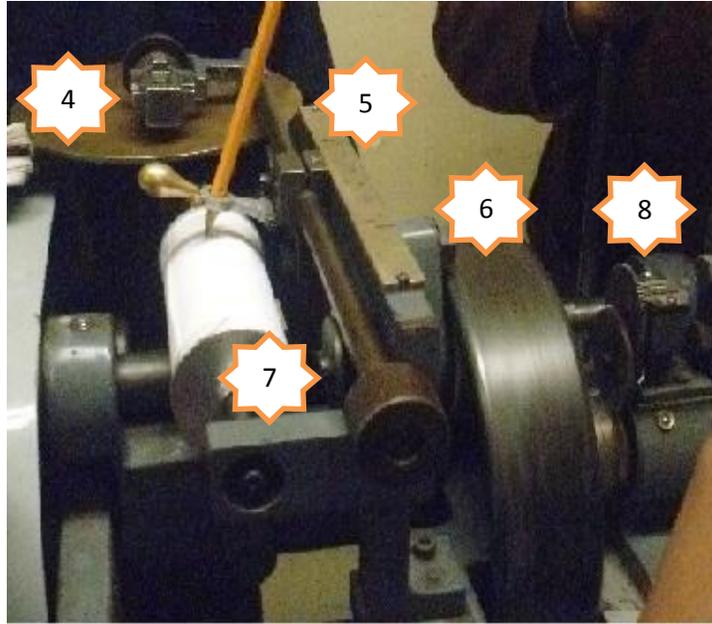
Dinamómetro de péndulo de longitud constante y masa variable.

Motor de baja y de alta velocidad.



*Figura 3.1 Máquina de desgaste por abrasión AMSLER*

No.	Descripción
	<b>MOTOR:</b>
1	1410 rev / min (baja) 2760 rev / min (alta)
2	<b>CABEZAL FIJO</b>
	<b>CABEZAL DE TREN DE ENGRANES.</b>
3	Aumentan velocidad 10 %, levas para el desplazamiento horizontal o vertical.



*Figura 3.2 Partes del integrador de la máquina de desgaste por abrasión AMSLER*

No.	Descripción
	INTEGRADOR
4	Volante 41.3, tambor centesimal, tacómetro.
5	ESCALA MEDIDORA DE TORQUE
6	TAMBOR
7	TAMBOR PARA GRÁFICA
8	CUENTA CICLOS Tacómetro.

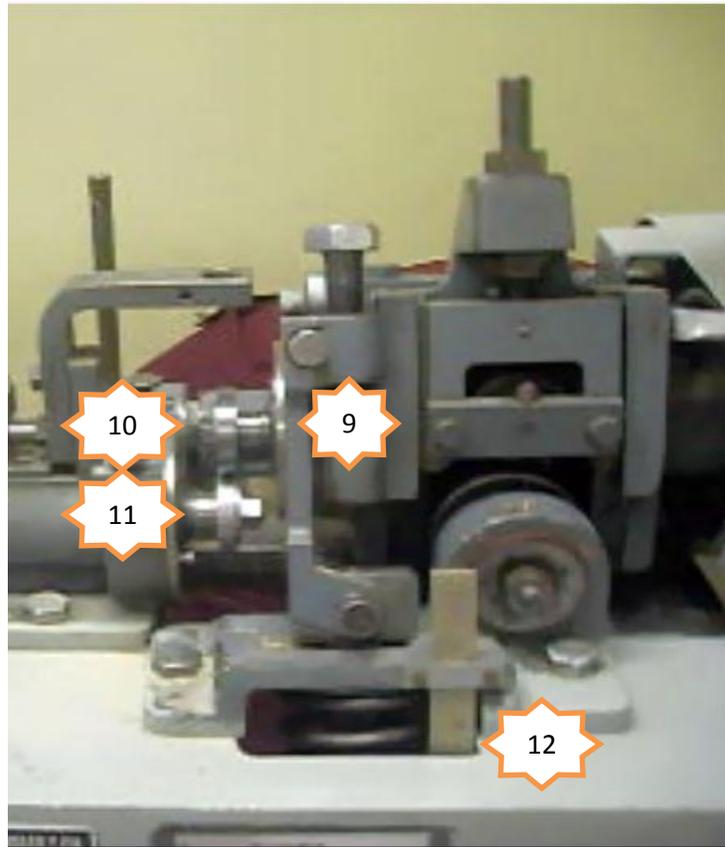


Figura 3.3 Flechas de transmisión de la máquina de desgaste por abrasión AMSLER

No.	Descripción
9	FLECHA PRIMARIA Montada probeta abrasiva, cuenta ciclos e integrador.
10	PROBETA ABRASIVA
11	PROBETAS SENSIBLES ACERO AISI 1045 y ACERO 4140
12	RESORTE CALIBRADO Para dar el empuje radial de 0 a 200 kg (presión de las probetas)

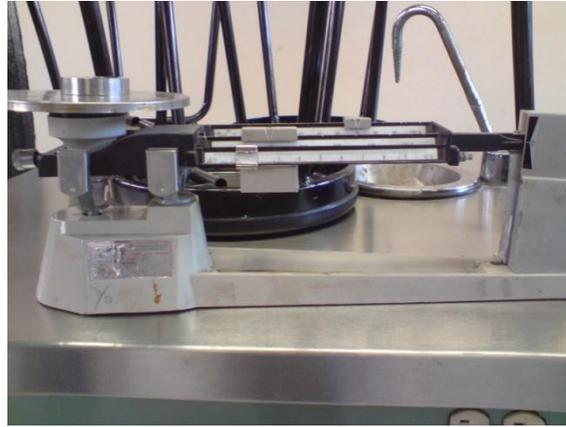


Figura 3.4 Báscula del laboratorio de química

No.	Descripción
13	Báscula cuenta con una legibilidad de 0.1gr, con esta bascula se realizaron los pesos de las probetas (Peso Inicial y Peso Final).

#### METODOLOGÍA DEL ENSAYE DE DESGASTE

1. Maquinado de las Probetas con un Diámetro de 5.08 mm (2"), espesor de 10 mm (1/2"), barreno de 16 mm (5/8") y pulidas.
2. Obtención de los Medios Abrasivos:

	Acero AISI SAE D-2
<b>Probeta abrasiva</b>	Rc = 62
	Peso = 122.4715 g
<b>Material arena</b>	Arena silica
<b>Material aceite</b>	Aceite monogrado SAE 40
<b>Material petróleo</b>	Petróleo Diáfano

3. Procedimiento para la medición de diámetros. [11]
  - a. Liberar el cabezal móvil (abatible).
  - b. Abatirlo a la posición neutra.
  - c. Separar el cuenta ciclos de la barra del integrador.
  - d. Montar la probeta en la flecha principal.

- e. Observar el cuenta ciclos.
  - f. Si no se encuentra en cero girar a mano el volante hasta que la última cifra digital sea cero (y en cero las indicaciones de los engranes reductores).
  - g. Montar el volante del CC2 (con perno correspondiente en el cabezal de la flecha principal sobre la probeta).
  - h. Teniendo en cuenta el selector de 220 ó 440 r.p.m. conectar el cable a la línea de 220 volts.
  - i. Levantar el péndulo del dinamómetro de torques (sin contra pesos, a su máxima altura sin golpear la bancada y mantenerlo en esa posición).
  - j. Conectar el motor a baja velocidad, después bajar el péndulo suavemente.
  - k. Desconectar el motor cuando se acerque a 9 en el cuenta ciclos #1.
  - l. Completar la lectura girando a mano la flecha principal.
  - m. Anotar la lectura final del CC2 enteros y centésimos.
  - n. Extraer el integrador y la probeta de la flecha principal o primaria.
4. Presentación de Resultados

Lecturas de los Tacómetros

MINUTOS	CC1 (mm)	CC2 (mm)	TORQUE
---------	----------	----------	--------

5. Cálculos

- a. Diámetros Inicial y Final

$$D_{1,2} = \frac{41.3 \cdot (\text{Lectura del tacómetro})}{100}$$

- b. Peso de la Probeta Inicial y Final

$$\text{Peso}_{\text{Calculado Inicial/Final}} = \delta \cdot (D^2 - d^2)$$

- c. Área Global

$$A_G = \pi \cdot D_2 \cdot l \cdot n$$

- d. Coeficiente Global Tribológico

$$C_{G_{\text{TRIBOLÓGICO}}} = \frac{\text{Peso Perdido } g}{\text{Área de Desgaste } m^2 \cdot \text{Tiempo de Prueba } min} \times \frac{60}{Hr} \times \frac{1.5320}{m^2}$$

e. Factores de Desgaste

$$\text{Medio Abrasivo} \quad \begin{array}{l} n \\ n_{\text{Medio Abrasivo}} \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{-----} \\ \text{-----} \end{array} \quad \begin{array}{l} 1 \\ X \end{array} \quad \therefore \quad X = \frac{n_{\text{Medio Abrasivo}} (1)}{n} \quad X = ?$$

f. Coeficientes Específicos Tribológicos

$$\text{Medio Abrasivo} \quad C_E = C_G \cdot F_{D_{\text{Medio Abrasivo}}} \quad C_{E_{\text{TRIBOLÓGICO}}} = ? \frac{g}{m^2 \cdot Hr}$$

6. Resultados

a. Datos Generales

1045	4140
$C_{G_{\text{TRIBOLÓGICO}}} = \frac{g}{m^2 \cdot Hr}$	$C_{G_{\text{TRIBOLÓGICO}}} = \frac{g}{m^2 \cdot Hr}$
$P_{\text{inicial}} = \text{--- } g$ $P_{\text{final}} = \text{--- } g$	$P_{\text{inicial}} = \text{--- } g$ $P_{\text{final}} = \text{--- } g$
$Perdida = P_{\text{inicial}} - P_{\text{final}}$	$Perdida = P_{\text{inicial}} - P_{\text{final}}$

b. Factores de Desgaste en cada Medio Abrasivo

<b>Medio Abrasivo</b>	<b>1045</b> $\left[ \frac{g}{m^2 \cdot Hr} \right]$	<b>4140</b> $\left[ \frac{g}{m^2 \cdot Hr} \right]$
-----------------------	---	---

7. Gráficos

## DATOS OBTENIDOS EN LA PROBETA DE ACERO 1045

### Dimensiones

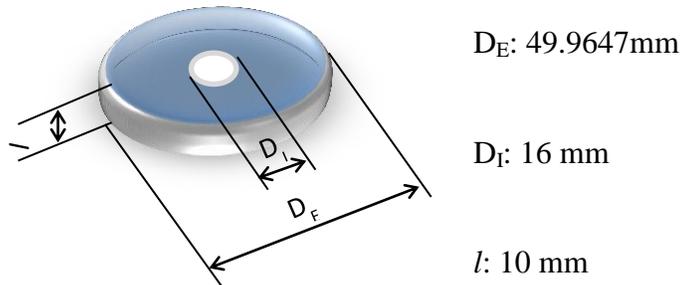


Figura 3.5 Dimensiones de la probeta de Acero AISI 1045

### LECTURAS DE LOS TACÓMETROS:

Donde: CC1= CUENTA CICLOS

CC2= INTEGRADOR

Tabla 3.1 Lecturas de los tacómetros: Seco con Acero AISI 1045

MINUTOS	CC1 (mm)	CC2 (mm)	TORQUE
0	91457	0	30
1	91483	3.42	20
2	91504	6.18	17
3	91527	8.55	15
4	91541	11.84	15
5	91574	13.22	15



Figura 3.6

Tabla 3.2 Lecturas de los tacómetros: Aceite con Acero AISI 1045

<b>MINUTOS</b>	<b>CC1 (mm)</b>	<b>CC2 (mm)</b>	<b>TORQUE</b>
<b>0</b>	91574	13.22	15
<b>1</b>	91597	18.63	20
<b>2</b>	91620	18.74	20
<b>3</b>	91644	21.63	20
<b>4</b>	91667	24.59	20
<b>5</b>	91690	27.52	20



Figura 3.7 Ensayo de la probeta de Acero AISI 1045 con Aceite.

*TABLA 3.3 Lecturas de los tacómetros: Arena silica con Acero AISI 1045*

<b>MINUTOS</b>	<b>CC1 (mm)</b>	<b>CC2 (mm)</b>	<b>TORQUE</b>
<b>0</b>	91690	27.52	20
<b>1</b>	91714	29.86	25
<b>2</b>	91736	34.58	45
<b>3</b>	91760	41.57	53
<b>4</b>	91783	49.45	60
<b>5</b>	91806	59.79	85



*Figura 3.8 Ensayo de la probeta de Acero AISI 1045 con Arena silica.*

*Tabla 3.4 Lecturas de los tacómetros: Petróleo diáfano con Acero AISI 1045*

<b>MINUTOS</b>	<b>CC1 (mm)</b>	<b>CC2 (mm)</b>	<b>TORQUE</b>
<b>0</b>	91806	59.79	85
<b>1</b>	91830	65.26	28
<b>2</b>	91853	69.45	28
<b>3</b>	91876	73.62	27
<b>4</b>	91900	77.67	26
<b>5</b>	91924	87.73	26



Figura 3.9 Ensayo de la probeta de Acero AISI 1045 con Petróleo diáfano.

### **CÁLCULOS, RESULTADOS Y GRÁFICOS DEL ACERO 1045:**

Diámetro exterior inicial de la probeta:

$$D_1 = \frac{41.3 \cdot (\text{Lectura del tacómetro})}{100}$$

$$D_1 = \frac{41.3 \cdot 120.98}{100}$$

$$D_1 = 49.9647 \text{ mm}$$

Diámetro exterior al final de la prueba:

$$D_2 = \frac{41.3 \cdot (\text{Lectura del tacómetro})}{100}$$

$$D_2 = \frac{41.3 \cdot 118.64}{100}$$

$$D_2 = 48.998 \text{ mm}$$

Peso de la Probeta:

$$P_{inicial} = 170 \text{ g} \quad \text{Peso}_{Calculado Inicial} = \delta \cdot (D^2 - d^2)$$

$$P_{final} = 169.4 \text{ g} \quad \text{Peso}_{Calculado Inicial} = (0.785) \cdot [(49.9647)^2 - (16)^2]$$

$$\text{Peso}_{Calculado Inicial} = 175.87 \text{ g}$$

$$Perdida = P_{inicial} - P_{final} \quad \text{Peso}_{Calculado Final} = \delta \cdot (D^2 - d^2)$$

$$Perdida = 170 - 169.4 \quad \text{Peso}_{Calculado Final} = (0.785) \cdot [(48.998)^2 - (16)^2]$$

$$Perdida = 0.6 \text{ g} \quad \text{Peso}_{Calculado Final} = 168.36 \text{ g}$$

Área Global:

$$A_G = \pi \cdot D_2 \cdot l \cdot n$$

$$A_G = \pi \cdot 0.48998 \cdot 0 - 0.0096 \cdot 467$$

$$A_G = 0.6899 \text{ m}^2$$

Coefficiente Global Tribológico:

$$C_{G_{TRIBOLÓGICO}} = \frac{0.6 \text{ g}}{0.6899 \text{ m}^2 \cdot 20 \text{ min}} \times \frac{60}{\text{Hr}} \times \frac{1.5320}{\text{m}^2}$$

$$C_{G_{TRIBOLÓGICO}} = 3.9971 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{Hr}}$$

Factores de Desgaste:

Medio Abrasivo	$n$	-----	1	$\therefore$	$X = \frac{n_{Medio Abrasivo}(1)}{n}$	$X = ?$
	$n_{Medio Abrasivo}$	-----	X			
Seco	467	-----	1	$\therefore$	$X = \frac{117(1)}{467}$	$X = 0.2505$
	117	-----	X			
Aceite	467	-----	1	$\therefore$	$X = \frac{116(1)}{467}$	$X = 0.2483$
	116	-----	X			

$$\begin{array}{l} \text{Arena Silica} \quad 467 \quad \text{-----} \quad 1 \\ \quad \quad \quad \quad 116 \quad \text{-----} \quad X \end{array} \quad \therefore \quad X = \frac{116(1)}{467} \quad X = 0.2483$$

$$\begin{array}{l} \text{Petróleo Diáfano} \quad 467 \quad \text{-----} \quad 1 \\ \quad \quad \quad \quad 118 \quad \text{-----} \quad X \end{array} \quad \therefore \quad X = \frac{118(1)}{467} \quad X = 0.2526$$

Coefficientes Específicos Tribológicos:

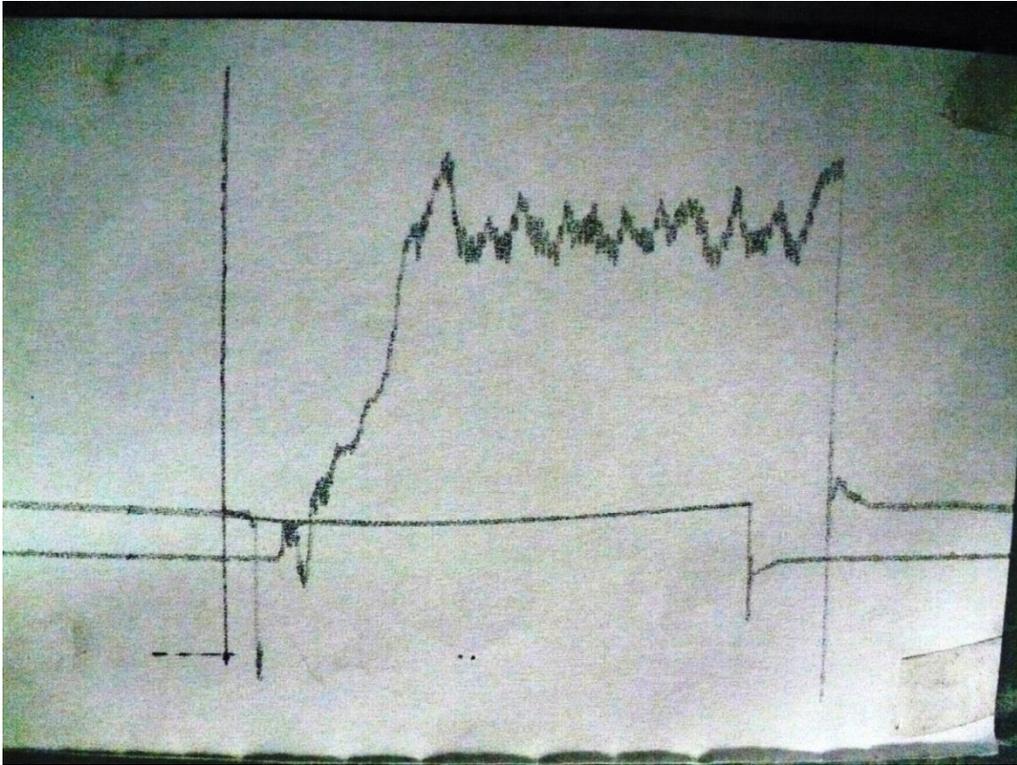
$$\text{Medio Abrasivo} \quad C_E = C_G \cdot F_{D_{\text{Medio Abrasivo}}} \quad C_{E_{\text{TRIBOLÓGICO}}} = ? \frac{g}{m^2 \cdot Hr}$$

$$\text{Metal - Seco} \quad C_E = 3.9971(0.2505) \quad C_{E_{\text{TRIBOLÓGICO}}} = 1.001 \frac{g}{m^2 \cdot Hr}$$

$$\text{Metal - Aceite} \quad C_E = 3.9971(0.2483) \quad C_{E_{\text{TRIBOLÓGICO}}} = 0.9924 \frac{g}{m^2 \cdot Hr}$$

$$\text{Metal - Arena Silica} \quad C_E = 3.9971(0.2483) \quad C_{E_{\text{TRIBOLÓGICO}}} = 0.9924 \frac{g}{m^2 \cdot Hr}$$

$$\text{Metal - Petróleo Diáfano} \quad C_E = 3.9971(0.2526) \quad C_{E_{\text{TRIBOLÓGICO}}} = 1.0096 \frac{g}{m^2 \cdot Hr}$$



*Gráfica 3.1 Gráfica de desgaste obtenida en la máquina de desgaste por abrasión AMSLER del Acero AISI 1045.*

## DATOS OBTENIDOS EN LA PROBETA DE ACERO 4140

### Dimensiones

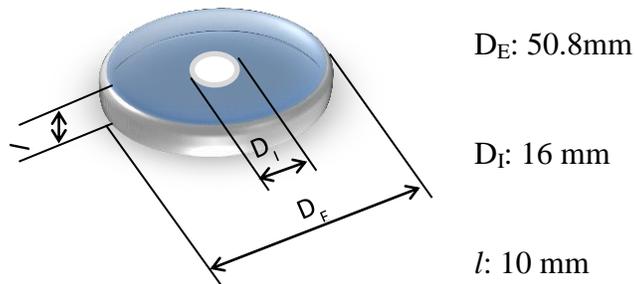


Figura 3.10 Dimensiones de la probeta de Acero AISI 4140

### LECTURAS DE LOS TACÓMETROS:

Donde: CC1= CUENTA CICLOS

CC2= INTEGRADOR

Tabla 3.5 Lecturas de los tacómetros: Seco con Acero AISI 4140

MINUTOS	CC1 (mm)	CC2 (mm)	TORQUE
0	64	0	25
1	64	3.54	22
2	88	6.70	21
3	111	9.94	21
4	134	13.15	21
5	178	16.20	20.9

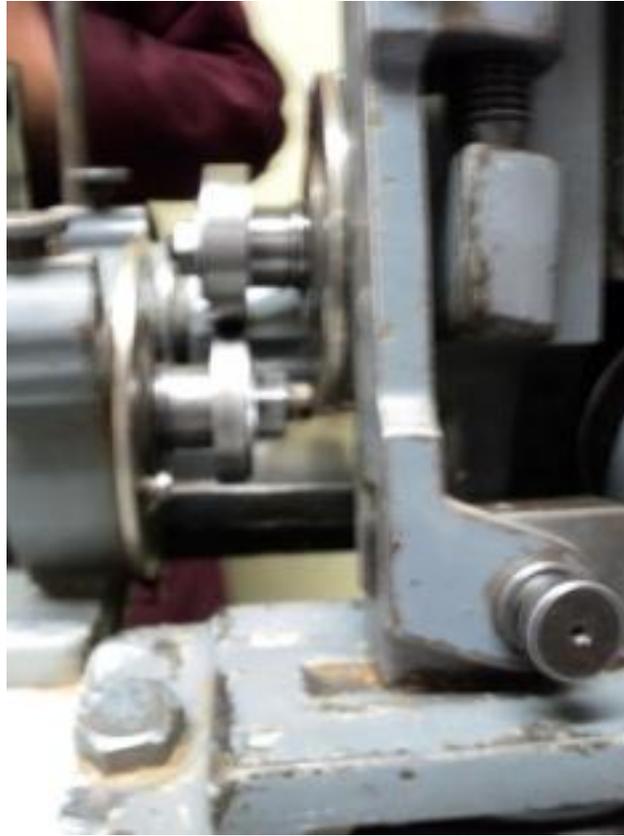


Figura 3.11 Ensayo de la probeta de Acero AISI 4140 en Seco.

Tabla 3.6 Lecturas de los tacómetros: Aceite con Acero AISI 4140

<b>MINUTOS</b>	<b>CC1 (mm)</b>	<b>CC2 (mm)</b>	<b>TORQUE</b>
<b>0</b>	178	16.20	20.9
<b>1</b>	181	19	18.5
<b>2</b>	204	21.80	18.5
<b>3</b>	227	24.61	18
<b>4</b>	258	28.9	18.5
<b>5</b>	278	31.25	18



Figura 3.12 Ensayo de la probeta de Acero AISI 4140 con Aceite.

Tabla 3.7 Lecturas de los tacómetros: Arena silica con Acero AISI 4140

<b>MINUTOS</b>	<b>CC1 (mm)</b>	<b>CC2 (mm)</b>	<b>TORQUE</b>
<b>0</b>	278	31.25	18
<b>1</b>	283	38.60	83
<b>2</b>	335	50.80	80
<b>3</b>	358	62.60	79
<b>4</b>	381	74.50	77
<b>5</b>	420	86.45	85



*Figura 3.13 Ensayo de la probeta de Acero AISI 4140 con Arena silica.*

*Tabla 3.8 Lecturas de los tacómetros: Petróleo diáfano con Acero AISI 4140*

<b>MINUTOS</b>	<b>CC1 (mm)</b>	<b>CC2 (mm)</b>	<b>TORQUE</b>
<b>0</b>	420	86.45	85
<b>1</b>	438	91.55	24
<b>2</b>	453	95.00	23
<b>3</b>	476	98.50	22.5
<b>4</b>	499	101.90	22
<b>5</b>	534	106.92	22



Figura 3.14 Ensayo de la probeta de Acero AISI 4140 con Petróleo diáfano.

### **CÁLCULOS, RESULTADOS Y GRÁFICOS DEL ACERO 4140:**

Diámetro exterior inicial de la probeta:

$$D_1 = \frac{41.3 \cdot (\text{Lectura del tacómetro})}{100}$$

$$D_1 = \frac{41.3 \cdot 123.6}{100}$$

$$D_1 = 51.0469 \text{ mm}$$

Diámetro exterior al final de la prueba:

$$D_2 = \frac{41.3 \cdot (\text{Lectura del tacómetro})}{100}$$

$$D_2 = \frac{41.3 \cdot 122.9}{100}$$

$$D_2 = 50.7577 \text{ mm}$$

Peso de la Probeta:

$$\begin{aligned}
 P_{inicial} &= 188.3 \text{ g} & P_{\text{Calculado Inicial}} &= \delta \cdot (D^2 - d^2) \\
 P_{final} &= 187.5 \text{ g} & P_{\text{Calculado Inicial}} &= (0.787) \cdot [(51.0469)^2 - (16)^2] \\
 & & P_{\text{Calculado Inicial}} &= 184.92 \text{ g} \\
 \\ 
 Perdida &= P_{inicial} - P_{final} & P_{\text{Calculado Final}} &= \delta \cdot (D^2 - d^2) \\
 Perdida &= 188.3 - 187.5 & P_{\text{Calculado Final}} &= (0.787) \cdot [(50.7577)^2 - (16)^2] \\
 Perdida &= 0.8 \text{ g} & P_{\text{Calculado Final}} &= 182.61 \text{ g}
 \end{aligned}$$

Área Global:

$$\begin{aligned}
 A_G &= \pi \cdot D_2 \cdot l \cdot n \\
 A_G &= \pi \cdot 0.0508 \cdot 0.0096 \cdot 444 \\
 A_G &= 0.6741 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

Coefficiente Global:

$$\begin{aligned}
 C_{G_{TRIBOLÓGICO}} &= \frac{0.8 \text{ g}}{0.6741 \text{ m}^2 \cdot 20 \text{ min}} \times \frac{60}{\text{Hr}} \times \frac{1.5320}{\text{m}^2} \\
 C_{G_{TRIBOLÓGICO}} &= 5.4543 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{Hr}}
 \end{aligned}$$

Factores de Desgaste:

Medio Abrasivo	$n$	-----	1	$\therefore$	$X = \frac{n_{\text{Medio Abrasivo}}(1)}{n}$	$X = ?$
	$n_{\text{Medio Abrasivo}}$	-----	X			
Seco	444	-----	1	$\therefore$	$X = \frac{114(1)}{444}$	$X = 0.2567$
	114	-----	X			
Aceite	444	-----	1	$\therefore$	$X = \frac{97(1)}{444}$	$X = 0.2184$

97 ----- X

$$\begin{array}{l} \text{Arena Silica} \quad \begin{array}{ccc} 444 & \text{-----} & 1 \\ 137 & \text{-----} & X \end{array} \quad \therefore \quad X = \frac{137(1)}{444} \quad X = 0.3085 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{Petróleo Diáfano} \quad \begin{array}{ccc} 444 & \text{-----} & 1 \\ 96 & \text{-----} & X \end{array} \quad \therefore \quad X = \frac{96(1)}{444} \quad X = 0.2162 \end{array}$$

Coefficientes Específicos:

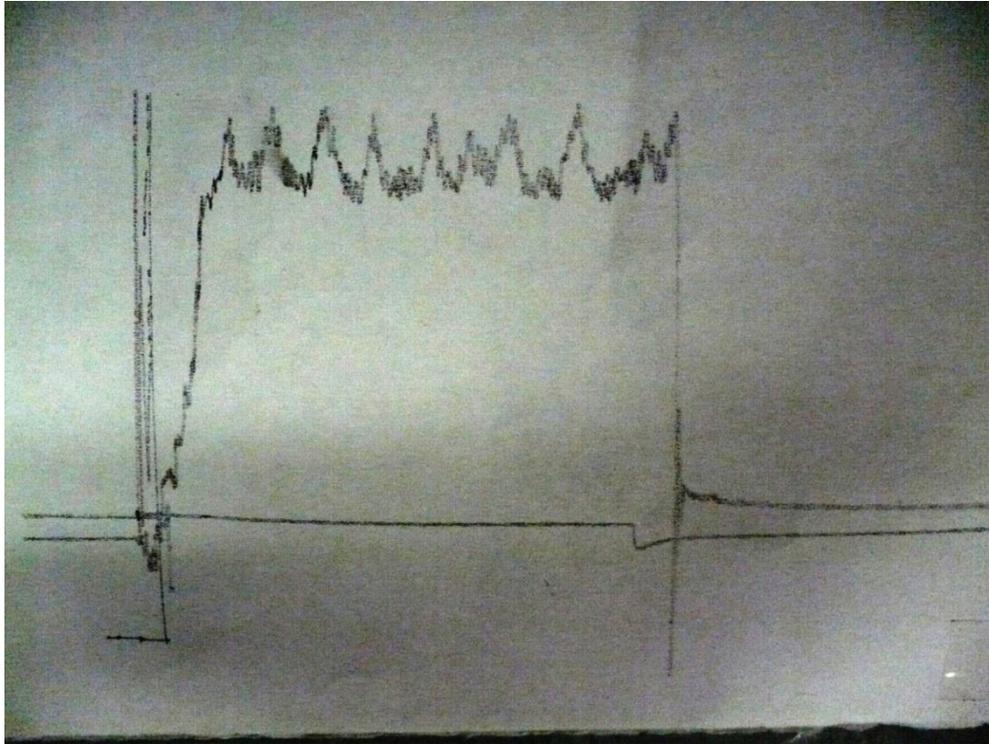
$$\text{Medio Abrasivo} \quad C_E = C_G \cdot F_{D_{\text{Medio Abrasivo}}} \quad C_{E_{\text{TRIBOLÓGICO}}} = ? \frac{g}{m^2 \cdot Hr}$$

$$\text{Metal - Seco} \quad C_E = 5.4543(0.2567) \quad C_{E_{\text{TRIBOLÓGICO}}} = 1.4001 \frac{g}{m^2 \cdot Hr}$$

$$\text{Metal - Aceite} \quad C_E = 5.4543(0.2184) \quad C_{E_{\text{TRIBOLÓGICO}}} = 1.1912 \frac{g}{m^2 \cdot Hr}$$

$$\text{Metal - Arena Silica} \quad C_E = 5.4543(0.3085) \quad C_{E_{\text{TRIBOLÓGICO}}} = 1.6826 \frac{g}{m^2 \cdot Hr}$$

$$\text{Metal - Petróleo Diáfano} \quad C_E = 5.4543(0.2162) \quad C_{E_{\text{TRIBOLÓGICO}}} = 1.1792 \frac{g}{m^2 \cdot Hr}$$



*Gráfica 3.2 Gráfica de desgaste obtenida en la máquina de desgaste por abrasión AMSLER del Acero AISI 4140.*

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla 3.9 Resultados de los ensayos de desgaste

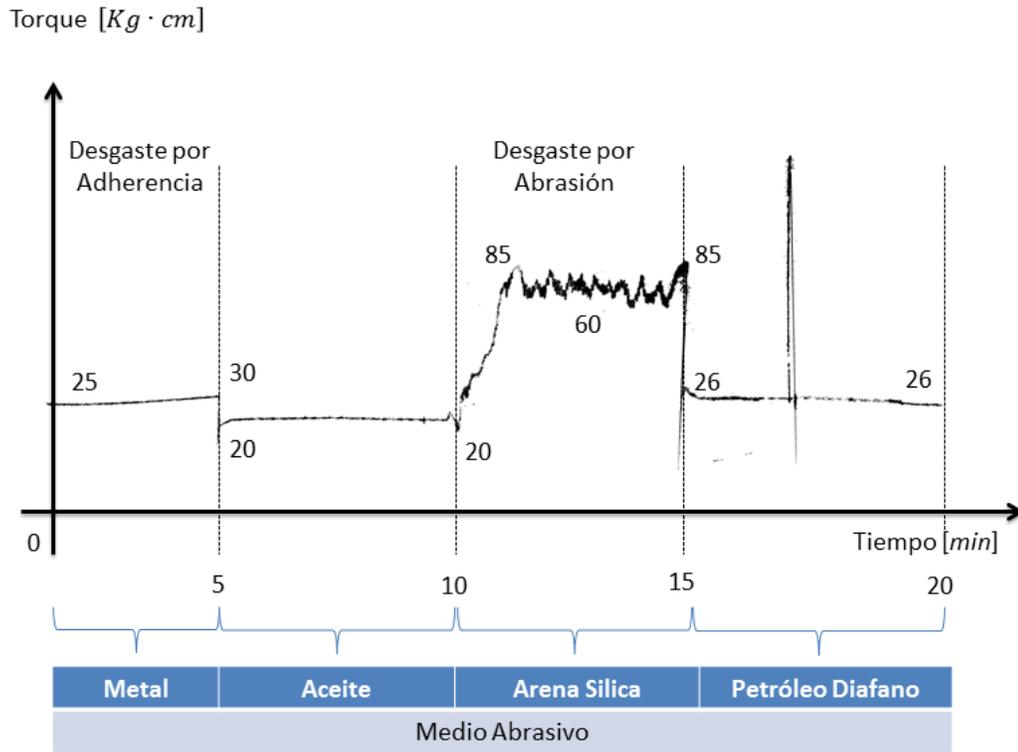
	AISI 1045	AISI 4140
Diámetro Inicial	$D_1 = 49.9647 \text{ mm}$	$D_1 = 51.0469 \text{ mm}$
Diámetro Final	$D_2 = 48.998 \text{ mm}$	$D_2 = 50.7577 \text{ mm}$
Diferencia de Diámetro	$D_D = 0.9667 \text{ mm}$	$D_D = 0.2892 \text{ mm}$
Peso Inicial	$P_{inicial} = 170 \text{ g}$	$P_{inicial} = 188.3 \text{ g}$
Peso Final	$P_{final} = 169.4 \text{ g}$	$P_{final} = 187.5 \text{ g}$
Peso Perdido	$Perdida = 0.6 \text{ g}$	$Peso perdido = 0.8 \text{ g}$
<p>Como se demuestra de forma algebraicamente y física, se comprueba que por medio del desgaste y los medios abrasivos a los que fue sometida la probeta, reducen el material, por consecuencia la reducción de diámetros.</p>		
Área Global	$A_G = 0.6741 \text{ m}^2$	$A_G = 0.6741 \text{ m}^2$
Coefficiente General Tribológico	$C_{GT} = 3.9971 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{Hr}}$	$C_{GT} = 5.4543 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{Hr}}$
<p>Para obtener estos datos, calculamos el área superficial de desgaste de la probeta (<math>A_G</math>), al conocer este valor, podemos determinar el Coeficiente General Tribológico de la Probeta. En las unidades de <math>\left[\frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{Hr}}\right]</math>, valor determinado de forma experimental y factible.</p>		
Factor de Desgaste:		
Metal – Seco	$X = 0.2505$	$X = 0.2567$
Metal – Aceite	$X = 0.2483$	$X = 0.2184$
Metal - Arena Silica	$X = 0.2483$	$X = 0.3085$
Metal - Petróleo Diáfano	$X = 0.2526$	$X = 0.2162$
<p>Derivado del Coeficiente General de cada probeta, determinamos el prorrateo de cada medio abrasivo de desgaste, mediante el cual calcularemos el Coeficiente específico de los medios abrasivos aplicados en el experimento.</p>		

	AISI 1045	AISI 4140
Coefficientes Específicos Tribológicos:		
Metal - Seco	$C_{ET} = 1.001 \frac{g}{m^2 \cdot Hr}$	$C_{ET} = 1.4001 \frac{g}{m^2 \cdot Hr}$
Metal - Aceite	$C_{ET} = 0.9924 \frac{g}{m^2 \cdot Hr}$	$C_{ET} = 1.1912 \frac{g}{m^2 \cdot Hr}$
Metal - Arena Silica	$C_{ET} = 0.9924 \frac{g}{m^2 \cdot Hr}$	$C_{ET} = 1.6826 \frac{g}{m^2 \cdot Hr}$
Metal - Petróleo Diáfano	$C_{ET} = 1.0096 \frac{g}{m^2 \cdot Hr}$	$C_{ET} = 1.1792 \frac{g}{m^2 \cdot Hr}$
Estos valores representan los Coeficientes Específicos de cada Medio de Abrasión a los que fueron sometidas las probetas.		

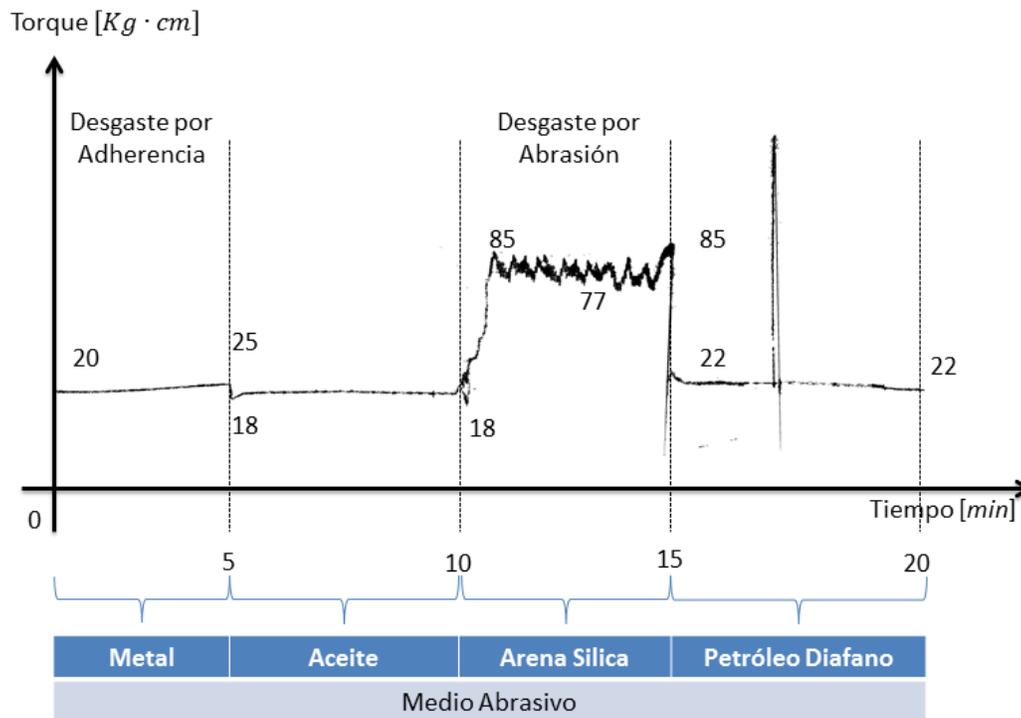
### ANÁLISIS DE LAS GRÁFICAS

Las Gráficas 3.3 y 3.4, muestran los aceros AISI 1045 y AISI 4140 las cuales ya han sido tratadas para observar cómo se incrementa el torque a través del tiempo y a la exposición de los diferentes medios de abrasión a los que fue sometidas las probetas.

Podemos apreciar que en el medio abrasivo en seco, se incrementa el torque en una escala reducida, debido a que el desgaste que se presenta en este caso es un desgaste por adherencia ya que se está transfiriendo material de una a otra superficie durante el movimiento relativo de las piezas. Al cambiar el medio abrasivo por aceite, el torque se reduce ya que estamos introduciendo un lubricante a las probetas, el cual nos reduce el desgaste por adherencia, en cambio, cuando incorporamos partículas sólidas en la zona del rozamiento, se presenta un desgaste por abrasión, generando un torque mayor durante el tiempo expuesto en este medio abrasivo. Y en el último medio de abrasión que es petróleo diáfano vemos la reducción de torque, debido a que es un lubricante y a la vez limpia las superficies de contacto de las probetas de las partículas.



Gráfica 3.3 Análisis de la gráfica del Acero AISI 1045.



Gráfica 3.4 Análisis de la gráfica del Acero AISI 4140.

# CAPÍTULO IV CONCLUSIONES TÉCNICAS

---

Se necesita controlar la fricción para minimizar el desgaste y el consumo de energía. Aunque en acciones tan cotidianas como caminar, recoger un objeto, abrir un libro, frenar un vehículo o hacer que el tren pueda desplazarse sobre los rieles se requiere la existencia de una fricción controlada y en las cuales la carencia absoluta de ella impediría llevarlas a cabo, el objetivo de la tribología es controlarla para evitar costos innecesarios.

Toda acción de los seres vivos o de la naturaleza se puede considerar un proceso tribológico que puede ser positivo o negativo según que evite o reduzca al máximo la fricción o la ocase.

La fricción, naturaleza de los materiales, rugosidad, desgaste, lubricación, energía y medio ambiente, son elementos inherentes en muchas de las disciplinas de la ingeniería, puede decirse, entonces que la Tribología debería ser objeto de estudio de todas las ingenierías. Por todo esto, la aplicación de los conocimientos de la Tribología deriva en: Ahorro de materias primas, Aumento en la vida útil de las herramientas y la maquinaria, Ahorro de recursos naturales, Ahorro de energía, Protección al medio ambiente y Ahorro económico.

A través de los ensayos realizados a las probetas se establecieron las siguientes conclusiones:

- En el proceso de maquinado de la probeta, debemos tener mucho cuidado para que se maquen a las medidas establecidas por las normas.
- Se utilizó la máquina para desgaste marca AMSLER, mediante la experimentación debemos evitar los errores de lectura en las obtenciones de datos.
- Se determinaron los coeficientes globales y específicos de los Aceros 1045 y 4140 en los Medios Abrasivos: en seco, con arena silica, con aceite y con petróleo diáfano.
- El torque aumento significativamente al agregarle la arena silica, debido a que es un material más abrasivo para las probetas.
- En el ensayo se observó que el coeficiente específico de metal con arena silica es mayor en comparación con los demás inclusive en metal con metal.
- Se puede apreciar el desgaste de los aceros, mediante las ecuaciones de Peso y por medio de una báscula, así pudiendo comparar ambos resultados en condiciones iniciales y condiciones finales.
- Al exponer las probetas a diferentes medios abrasivos, las lecturas obtenidas de los torques nos permiten comparar cómo cambia el coeficiente de desgaste, esto también se observa visualmente mediante las gráficas obtenidas, debido a que nos permite visualizar el comportamiento de los materiales en los medios abrasivos a los que fueron expuestos.

El estudio realizado a las probetas de acero 1045 y 4140 es costoso debido a que implicamos mano de obra calificada en cuanto al proceso de maquinado de las probetas y un técnico especializado en el manejo de la máquina de ensayo de desgaste. Se compensa este costo con los datos adquiridos a través de las fórmulas de obtención de los coeficientes globales tribológicos y los coeficientes específicos tribológicos.

# BIBLIOGRÁFIA

---

## Referencia

- 1 Aguilar Sánchez, José Rubén.(2009). *Tribology*. Atlantic International University: Tesis de Doctorado.
- 2 Rabinowicz, E. (1995). *Friction and wear of materials*. USA: John Wiley
- 3 SARKAR, A.D (1990). *Desgaste de metales*. México: Ed. Noriega Limusa 1era. Ed.
- 4 Chavez Martinez, Francisco (2002). *La tribología : Ciencia y Técnica para el Mantenimiento*. México: Ed. Noriega Limusa 2da reimpresión.
- 5 Bharat, Bhushan. (1999). *Principles and Applications of Tribology*. USA: John Willey -Interscience,
- 6 Department of Trade and Industry, Wear Resistant Surfaces in Engineering. (1978). *A Guide to Their Production, Properties and Selection*.UK: HMSO.
- 7 Stolarski, T. A. (1991). *Tribology in Machine Design*, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data.
- 8 Hutchings, I.M. (1992). *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. UK: Edward Arnold.
- 9 Albarracin Pedro. *Tribologia y Lubricación Industrial y Automotriz*. México
- 10 PEÑA, ALEJANDRO. (2002). *Caracterización Mecánica y Tribológica del Al 6061-T651 y del Al 6061-T651 con Recubrimiento de Fosfato de Cromo*. México: SEPI – ESIME ZACATENCO.
- 11 ASTM International Designation: G-115 – 04 Standard Guide for Measuring and Reporting Friction Coefficients.
- 12 Jose Luddey Marulanda A., Alberto Zapata Meneses y Carlos Augusto Estrada. (2009). *Construcción de una Máquina para Ensayo en Desgaste Abrasivo; Según Norma Técnica ASTM G-65*. Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.

## Figuras de Desgaste

	Fuente
Figura 2.1	Archad J.F, J. Apl. Phys. 24, 981-988, 1953
Figura 2.2	L. Chen and D. Rigney, Proc. Intl. Conf. on Wear of Materials, 437, ASME, 1985
Figura 2.3	Department of Trade and Industry, Wear Resistant Surfaces in Engineering, A Guide to Their Production, Properties and Selection, HMSO, UK, 1978
Figura 2.4	ASM Handbook, Friction, Lubrication and Wear Technology, Vol. 18, ASM International, USA, 1998
Figura 2.5	L.K. Ives, NIST
Figura 2.6	Department of Trade and Industry, Wear Resistant Surfaces in Engineering, A Guide to Their Production, Properties and Selection, HMSO, UK, 1978
Figura 2.7	Raymond G. Bayer, Mechanical Wear, Prediction and Prevention, Dekker, USA, 1994
Figura 2.8	K. Kato, Wear Mode Transitions, Scripta Metall., Vol. 24, 1990
Figura 2.9	Misra A and Finnie I, Wear 65, 359-373, 1981
Figura 2.10	M.M. Krushchov and M.A. Babichev, An Investigation Of the Wear of Metals and Alloys by Rubbin on an Adhesive Surface, Friction and Wear in Machinery, Vol. 12, 1958
Figura 2.11	L. K, Ives, NIST
Figura 2.12	Khrushchov M. M., Proc. Conference. on Lubrication and Wear, Inst. of Mechanical Engineers, London, 1957
Figura 2.13	R. Bellman, Jr. And Levy, Platelet Mechanism of Erosion of Ductile Metals, Proceeding of International Conference on Wear of Materials, ASME, 1981
Figura 2.14	T. H. Kosel. A. P. L .Turner, and R. O. Scattergood, Effects of Particle Size and Shape on Erosive Wear Mechanisms in Corrosion-Erosion Behavior of Materials, TMS-AIME, 1980
Figura 2.15	ASM Handbook, Friction, Lubrication and Wear Technology, Vol. 18, ASM International, USA, 1998
Figura 2.16	I. M. Hutchings, Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, Edward Arnold, UK, 1992

- Figura 2.17 K. Zum Ghar,  
Proc. Intl. Conf. On Wear of Materials,  
ASME, 1981
- Figura 2.18 K.H. Zum Gahr,  
Microstructure and Wear of Materials,  
Elsevier, 1987
- Figura 2.19 B. Vyas AND C. M. Prece,  
Cavitation Induced Deformation of Aluminum, Erosion, Wear and Surfaces  
with Corrosion,  
ASTM, 1973
- Figura 2.20 E. H. R. Wade and C. M. Prece,  
Cavitation Erosion of Iron and Steel, Metall. Trans.,  
Vol. 9A, 1978
- Figura 2.21 ASM Handbook, Friction, Lubrication and Wear Technology, Vol. 18,  
ASM International, USA, 1998
- Figura 2.22 R. Bill,  
Proc. Intl. Conf. On Wear Materials,  
ASME, 350, 1979

Páginas web consultadas.

<http://www.ingenierosdelubricacion.com/espanol>

<http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/>

Normas

ATSM Designation: G 115 – 04

Standard Guide for Measuring and Reporting Friction Coefficients 1

Automotive Lubricant Testing and Additive Development