



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

TESIS

ESTUDIO DE DESGASTE EN UN ACERO H13 PARA
HERRAMIENTAS DE CONFORMADO MECANICO.

P R E S E N T A D A P O R :
ING. MIGUEL ANGEL RIVERA HERRERA
PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERIA (MECANICA)
AREA: DISEÑO Y MANUFACTURA

DIRIGIDA POR: DRA. D.M.K. DE GRINBERG



DEPFI

T. UNAM
1999
RIV.

AGRADECIMIENTOS

Un acto que nos hace sentir bien por un momento o por una vida es recibir un "agradecimiento sincero"... sin embargo, muchas veces nos cuesta mucho el reconocer y más aún expresar que GRACIAS a la ayuda y colaboración de otros llevamos a cabo nuestras metas...

Por lo anterior, considero que los agradecimientos que a continuación hago, son lo menos que puedo ofrecer para todos aquellos que hicieron realidad este sueño.... GRACIAS:

A DIOS por haberme dado la capacidad, paciencia, salud, los medios y principalmente la FE para realizar este sueño... Paz y Bien, GRACIAS A DIOS.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme abierto sus puertas y por brindarme la oportunidad de ser un Universitario y gritar un "goya" por este logro...

A la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, a través del Dr. Ricardo Aceves y del Dr. Vicente Borja por haberme brindado su apoyo y confianza.

A mi Director de Tesis Dra. Dora M. Krasnopolsky de Grinberg, a quien además de un buen Profesor considero una excelente persona, quien con su paciencia, trabajo, conocimientos, consejos, mano dura y confianza hizo realidad este proyecto.

A los miembros de mi jurado:

Dr. Marcelo López Parra
Dra. Dora María Krasnopolsky de Grinberg.
Dr. Vicente Borja Ramírez
Dr. José Manuel Saniger
Dr. Arturo Barba Pingarrón

Por sus valiosos comentarios y prontitud que me ofrecieron para el logro de este trabajo.

A quienes hicieron posible mis pininos en los estudios prácticos de desgaste:

CNEA (Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina)
JICA (Agencia de Cooperación Internacional del Japón).
UTN (Universidad Tecnológica Nacional de Argentina)

Y de manera especial al Dr. Adolfo Rodrigo, Dra. Elena Forlerer, Dr. Iroshi Ishimura y al Baen Sebastian, Gracias por todo.

G(2) 504207

A un gran Profesor y Amigo Dr. Jorge Carrera Bolaños, por sus valiosos consejos y comentarios.

A la Ing. Gail Suastegui, por haberme ayudado en el desarrollo experimental de este estudio.

Al personal administrativo de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, de manera especial a: Silvia, Laura, Milagros, Josefina y la Ing. Brisia, por su prontitud y eficiencia.

A mis Compañeros y Amigos de la Maestría por esos momentos que compartimos y vivimos en este proceso de aprendizaje: Luciano V., Roberto P., Enrique M., Said. R., Jacinto C. y Víctor A. ... aunque algunas durmamos debajo de un puente, o una mesa de la zona nos separe...

Hay acontecimientos que sin parecerlo son determinantes en la vida de una persona. Por lo que quiero aprovechar esta ocasión para agradecer al Ing. Simón Palomino porque sus valiosos y sabios comentarios fueron de gran apoyo para emprender este sueño, Gracias.

A mis Super Amigos (Tobis): Oscar H., Jesús T., Christian V., Alfonso A., Eloy S., Fco. Javier R., Hiram L., Ivan L., Ruben D., Dante H., Jesús G. A los perros de San José y a Ivan R. y Carlos C.; porque en las buenas y en las malas me han brindado su apoyo, y porque con su amistad contribuyeron al desarrollo de este sueño...

Un agradecimiento muy especial por su apoyo en todo momento, a mi amigo y hermano Fray Miguel Berrocali, gracias porque juntos logramos vencer este reto.

A las Hermanas Clarisas Capuchinas, por todas sus atenciones, cuidados y consejos durante este proceso de aprendizaje...

A mi tío Porfirio, a Pedro y a mi abuela Lupita, por todos sus cuidados, preocupaciones, atenciones y consejos, GRACIAS.

A mis reinas Vero, Pily y Mariana, a quienes agradezco sus atenciones, comprensión, cuidados, celos, consejos y amor.

A mis princesas Samadhi y Pily, porque cada una de ellas le ha dado un nuevo sentido a mi vida.

Al Lic. Ariel A. Linares H., mejor conocido como Neo, hijo, amigo, socio, cosino y hermano, por toda su confianza, consejos, apoyo y amor fraterno que ha tenido para conmigo, y además por ser uno de mis mejores ejemplos a seguir, Ariel este logro también es tuyo, GRACIAS.

Finalmente quiero agradecer a dos personas a las que debo lo que soy y lo que valgo, a mis padres: Mariano Rivera Silva y Ma. de Lourdes Herrera Vela, porque gracias a sus cuidados, desvelos, amor y confianza hice realidad uno más de mis sueños, el cual ofrezco con todo mi amor en calidad de agradecimiento por todo lo que han hecho por mi... GRACIAS Papá y Mamá.

SINCERAMENTE

M.I. Miguel Angel Rivera Herrera

México D.F. Noviembre de 1999.

CONTENIDO

CAPITULO I

1.- INTRODUCCIÓN	1
Resumen y objetivos del presente trabajo	
Breve definición de desgaste	
Efecto de la microestructura sobre la resistencia al desgaste	
Como se mide el desgaste	
Prueba Pin-on-disk	
Descripción del material a utilizar	
Referencias	4

CAPITULO II

2.1- DESGASTE.	6
2.1.1.-Revisión histórica	6
2.1.2.-Definición	6
2.1.3.-Descripción matemática	10
2.1.3.1.-Modelo de desgaste dinámico	13
2.1.3.1.1.-Desgaste y razón de desgaste	14
2.1.3.1.2.-Resistencia antidesgaste	16
2.1.3.1.3.-Fuerza cortante promedio	17
2.1.3.2.-Modelado	18
2.2.-MECANISMOS DE DESGASTE	21
2.3.-COEFICIENTE DE DESGASTE	26
2.3.1.-Coeficiente de desgaste para desgaste por adhesión	27
2.3.2.-Naturaleza de la ecuación de desgaste	29
2.3.3.-Obtención del valor de dureza de la superficie	30
2.3.4.-Métodos de cálculo del coeficiente de desgaste	31
2.3.5.-Obtención del coeficiente de desgaste	31
2.3.6.-Tablas de consulta de coeficiente de desgaste	31
2.4.-DESGASTE POR DESLIZAMIENTO	32
2.4.1.-Desgaste por deslizamiento en los metales	34
Referencias	35

CAPITULO III

3.- INFLUENCIA DE LA MICROESTRUCTURA DE LOS METALES EN LOS DISTINTOS PROCESOS DE DESGASTE	37
3.1.-Microestructura y propiedades mecánicas de los metales.	37
3.2.-Estructura de los metales	37
3.3.-Estructura de las superficies de los metales	40
3.4.-Propiedades de volumen de los metales	41
3.5.-Propiedades de la superficie de los metales	46
Referencias	47

CAPITULO IV

4.- PRUEBAS TRIBOLÓGICAS	48
4.1.-Clasificación	48
4.2.-Pruebas modelo para la medición de desgaste	49
Referencias	51

CAPITULO V

5.- PRUEBAS ESPIGA SOBRE DISCO	
5.1.-Principio de operación	52
5.2.-ASTM: G99-90 ^e 1.	53
5.2.1.-Método estándares para pruebas de desgaste con máquinas Pin-on disk(espiga-sobre-disco)	53
Referencias	60

CAPITULO VI

6.- CLASIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE ACEROS PARA HERAMIENTAS	61
6.1.-Clasificación de aceros para herramientas	61
6.2.-Selección de aceros para herramientas	64
6.2.1.-Predicción de la funcionalidad	64
6.2.1.1-Factores que determinan la funcionalidad en la selección de aceros para herramientas	65
6.2.2.-Limitaciones de manufactura	67
6.3.-Comentarios	69
Referencias	

CAPITULO VII

7.- DESARROLLO EXPERIMENTAL	70
7.1.- Procedimiento	78
Referencias	80

CAPITULO VIII

8.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	81
8.1- Resultados	82
8.2- Discusión de Resultados	135

CAPITULO IX

9.-CONCLUSIONES	140
9.1.- Acero H13 en estado recocido	140
9.2.- Acero H13 en estado templado y revenido	141
9.3.- Generales	143

APENDICE

A.-Función probabilística acumulativa	i
B.- Modelo Físico	iii
B.1.-Flujo Resistivo	iii
B.2.-Esfuerzo cortante	iii
C.-determinación del perfil de esfuerzos y de resistencia	vi
C.1.-Perfiles de resistencia(flujo resistivo)	vi
C.2.-Perfiles de esfuerzo	vii
D.- Prueba espiga sobre disco	viii
D.1.-Espiga con punta esférica	viii
D.2.-Un disco	viii
Referencias	ix

CAPÍTULO I.

1.- INTRODUCCIÓN.

Considerando la falta de información que se tiene del comportamiento en desgaste de los diferentes materiales utilizados en la industria y la gran diversidad de parámetros que intervienen en un tribosistema y por consiguiente en los estudios de desgaste, siempre será importante saber como proponer un estudio de desgaste, de tal modo que la información que se obtenga sea útil y de referencia confiable.

Este trabajo tiene como objetivos: 1) proponer una metodología de un estudio de desgaste por deslizamiento. Para lo cual a manera de soporte partimos desde la importancia del fenómeno de desgaste, su definición y cada uno de los parámetros que se relacionan en presencia del mismo (razón de desgaste y coeficiente de desgaste). Una vez que contamos con esto, establecemos como es que se deben estudiar las diferentes situaciones de desgaste a través de la definición del tribosistema y consecuentemente de los diferentes mecanismos de desgaste. De igual modo presentamos el efecto de la microestructura de los materiales sobre las diferentes propiedades físicas y mecánicas, por consiguiente en su resistencia al desgaste. Posteriormente, presentamos el tipo de pruebas que se pueden utilizar en los estudios tribológicos. Después del análisis del tribosistema y una vez determinado el tipo de equipo a utilizar, presentamos la norma que estandariza el uso de este equipo. Como complemento presentamos una breve descripción propuesta por la AISI de lo que son los aceros para herramientas y los diferentes criterios que intervienen en su clasificación y aplicación. Con estas bases procedemos al desarrollo experimental, discusión de resultados, análisis de resultados y conclusiones. En la parte final de este trabajo presentamos el apéndice.

En cuanto a los parámetros del tribosistema que variamos para la realización de las pruebas en el presente estudio del acero seleccionado, enfatizamos el papel de la dureza, debido a que de acuerdo con la literatura se considera como un factor determinante en el comportamiento en desgaste además de la relativa facilidad de modificación y obtención de la misma en el material propuesto. Para este estudio, la variación de dureza la obtenemos mediante la aplicación de diferentes tratamientos térmicos: recocido y temple-revenido; lo cual afecta la microestructura del material en consideración y por consiguiente sus propiedades físicas y mecánicas. Al variar estas propiedades esperamos tener un cambio en su resistencia al desgaste, por lo que también tenemos como objetivo del presente estudio: 2) determinar la resistencia al desgaste del acero H13 en las 2 condiciones propuestas y 3) a su vez determinar el efecto de los tratamientos térmicos aplicados sobre la superficie de desgaste.

El desgaste se define como “la pérdida progresiva de material de la superficie de un cuerpo sólido debido a una acción mecánica” (DIN 50320) ^[1]. Generalmente las superficies deberán estar en movimiento relativo, que puede ser rotación o deslizamiento, o una combinación de éstas ^[2].

El desgaste rara vez es catastrófico, más bien se refleja en cambios dimensionales causando problemas como vibración, desalineamiento, etc., y consecuentemente una disminución de la eficiencia de las condiciones de operación. Al presentarse el desprendimiento de pequeñas partículas debido al desgaste en sistemas con claros y/o tolerancias pequeñas, éste puede representar mayor problema que los cambios dimensionales de los componentes ¹³¹.

Uno de los procesos de desgaste que se presenta de manera más frecuente es *el desgaste por deslizamiento*, el cual se refiere a un tipo de desgaste generado por el deslizamiento de una superficie en contra de otra. Al presentarse erosión, cavitación, daños por impacto, oxidación, corrosión, fretting (movimientos de oscilación-vibración), los daños o el desgaste que se genera es excluido del desgaste por deslizamiento, a pesar de que en realidad se pueda presentar un tipo de deslizamiento. Aparentemente sí uno de estos fenómenos se presenta, el desgaste por deslizamiento se excluye ¹⁴¹.

Las propiedades de los metales se ven influenciados por diferentes factores. Con el fin de modificar las propiedades mecánicas de los metales y de manera específica la resistencia al desgaste, se han presentado diferentes propuestas. Para la ciencia de materiales, se parte de una interpretación atomística de acuerdo a la cual las propiedades de un sólido están determinadas por su estructura interna (microestructura), entendiéndose por tal, en su contexto más amplio, la que resulta de sus átomos constituyentes para formar un sólido cristalino o amorfo. La existencia de fases múltiples, imperfecciones cristalinas, orientación de granos, etc., son factores que determinan las características de un material ¹⁵¹. Desde este punto de vista, el diseño y el control de la microestructura o estructura interna de los materiales es la clave que permite la fabricación de un material con características específicas de comportamiento mecánico, eléctrico, magnético, óptico, térmico, etc. Ahora bien, de manera general, el comportamiento de la microestructura de los materiales sujetos a procesos de desgaste depende de su composición química y su historial de producción donde se involucran los procesos de manufactura, tratamientos térmicos, termomecánicos, etc. Los efectos que se generan sobre la resistencia al desgaste al variar diferentes propiedades de los materiales y parámetros de los tribosistemas suelen ser muy diversos, por lo que falta mucho por desarrollar en esta área.

El desgaste es un proceso que en la práctica resulta difícil de medir, por lo que generalmente su medición se basa en pruebas experimentales que simulan determinadas condiciones de operación. La manera más simple de resumir los datos obtenidos en pruebas de desgaste se basa en observar los cambios de dimensión, volumen o masa en condiciones específicas, o bien los mismos parámetros por unidad de tiempo. Comúnmente la resistencia al desgaste se da como la inversa de alguna de esas cantidades, desde luego que al expresarlo de esta manera los resultados no son constantes de materiales, ya que se basan en condiciones experimentales particulares ¹⁶¹.

Desafortunadamente el reporte de datos obtenidos de las pruebas de desgaste realizadas no se ha estandarizado, sin embargo, muchos de los modelos de desgaste por deslizamiento proponen que el cambio de volumen se puede establecer mediante la siguiente relación ¹³¹:

$$\Delta V = k LS/3H \quad \dots 1.1$$

0

$$W = k LS/H \quad \dots 1.2$$

donde:

L.- carga,

S.- distancia de deslizamiento,

H.- dureza en Vickers,

k.- coeficiente de desgaste, 10^{-8} a 10^{-7} para desgaste medio y 10^{-4} a 10^{-3} para desgaste severo.

W.- desgaste (pérdida de volumen o masa)

Normalmente la razón de desgaste se reporta como $\Delta V/L$, W/L o $W/\Delta t$, y algunas veces se define un factor de desgaste como $\Delta V/LS$, $k/3H$ o W/LS .

Algunas veces el desgaste también se mide por tiempo de servicio, cuando el desgaste es quien determina la vida del equipo o material. Los rangos de desgaste comúnmente se reportan como valores relativos al desgaste de materiales estándares sujetos a las mismas condiciones del espécimen analizado, por lo que el uso de un material de buena referencia es imperativo. Ésta es la única forma de categorizar de alguna manera la resistencia al desgaste de los materiales para poder compararlos con otras condiciones de desgaste que se presenten, sin embargo difícilmente se presentan los mismos resultados aún cuando se han hecho grandes esfuerzos por igualar las condiciones de pruebas utilizadas. De hecho la cantidad de material perdido por diferentes especímenes en una prueba estándar, no debe de variar más de un 25%, lo que nos indicará que el sistema de prueba y análisis no está cambiando con el tiempo de tal manera que afecte las mediciones ^[3].

Las mediciones de desgaste de muchos materiales presentan una variación lineal del desgaste respecto a la carga, por lo que generalmente se puede extrapolar las condiciones de carga de las pruebas modelo a condiciones de carga mayores, que son las que generalmente se presentan en la realidad. Sin embargo, esto no siempre sucede, ya que se ven involucrados otros factores como lo es el cambio de la microestructura de los materiales debido a las temperaturas que se presentan en dichas condiciones y por consiguiente un cambio en sus propiedades físicas y mecánicas ^[3].

Con el fin de manejar de manera adecuada los efectos de las diferentes variables que intervienen en los procesos de desgaste, los equipos de prueba diseñados buscan la mayor aproximación en la simulación del proceso de desgaste. El equipo Pin-on-disk o Espiga-sobre-disco es utilizado para medir el desgaste por deslizamiento. La ASTM G99 establece que este equipo consiste básicamente en un disco o espiga rotatoria, los cuales se encuentran en contacto mutuo, y tienen una carga aplicada sobre uno de ellos por medio de un brazo mecánico o algún otro mecanismo, lo que genera una órbita sobre la superficie del disco. El desgaste se mide en términos del volumen perdido tanto de la espiga como del disco o bien de alguno de los dos dependiendo del caso. El análisis de los datos obtenidos en este tipo de pruebas generalmente incluye el análisis de las marcas generadas por el desgaste sobre el disco y las espigas de prueba, graficando el efecto del desgaste sobre el perfil de la parte desgastada ^[7]. A pesar de que este tipo de pruebas proporciona medidas precisas del desgaste, hay que considerar que también las mediciones son

dependientes del tiempo, por lo que en el caso de que se deseen hacer comparaciones, además de mantener las mismas condiciones de prueba se deben realizar en un mismo periodo de tiempo. Así como ésta observación en el desarrollo de las pruebas, existen otras características que se deben de considerar, sin embargo, es importante tener presente las características básicas de cualquier equipo de prueba ya que al ser consideradas y con ayuda de un procedimiento adecuado, los resultados obtenidos resultan ser bastante confiables.

En un diseño o aplicación ideal, para realizar la selección de un acero para herramientas se deben de considerar sus *propiedades mecánicas* de acuerdo a los requerimientos de la herramienta. Muchas de las herramientas presentarán resultados satisfactorios en diversos trabajos, y la duración o vida útil de cada una de ellas se obtendrá al comparar su productividad, funcionalidad y su costo, en pocas palabras la calidad de su *diseño*. La última condición base utilizada para realizar una selección adecuada de un acero para herramientas, es el costo final por unidad de partes producidas por la herramienta.

De acuerdo a lo mencionado, una vez que se tiene el concepto de diseño, el paso siguiente es evaluar las propiedades de los diferentes opciones de materiales para ese determinado propósito. Para determinar la funcionalidad, uno de los parámetros que interviene y que es de los más determinantes en la obtención de la funcionalidad es la *resistencia al desgaste*. Al obtener una buena resistencia al desgaste se esta dando un gran paso para garantizar una buena funcionalidad, por lo que resulta de suma importancia determinar esta propiedad.

A pesar de que se cuenta con tablas donde se pueden encontrar datos del comportamiento al desgaste de algunos aceros, hay que recordar que estos están basados en aplicaciones particulares, y por la naturaleza variante del fenómeno de desgaste resulta imperante realizar un estudio tribológico de desgaste para cada aplicación dada. En este caso proponemos un estudio en un acero H13 para herramientas para trabajo en caliente y considerado como un acero para herramientas de formado (AISI). El H13 tiene gran aplicación en la fabricación de dados para extrusión de aluminio y magnesio entre otras aplicaciones. Ahora bien, puesto que lo que nos interesa es determinar el comportamiento en desgaste del acero H13, tenemos que variar sus propiedades mecánicas para lo cual el acero H13, lo evaluamos bajo 2 diferentes condiciones de tratamientos térmicos: 1) en estado recocido y 2) en estado templado-revenido: debido a que lo que nos interesa es el comportamiento en desgaste del acero H13, para este estudio seleccionamos como cuerpo contrario un acero M2 de alta velocidad, por tener mejores propiedades mecánicas (resistencia al desgaste, dureza, tenacidad, maquinabilidad, etc.) que el acero H13. De esta forma garantizamos que el mayor desgaste se presente en cuerpo sólido (acero H13) y no en el cuerpo contrario (acero M2), garantizando de esta forma el estudio del comportamiento en desgaste del acero H13.

Referencias.

- [1] K - H. Zum Gahr
Microestructure and wear of materials.
Elsevier, 1987.

- [2] T.F.J. Quinn
Physical analysis for trybology.
Cambridge University, 1991.
- [3] Metals Handbook
Properties and selection iron and steel.
Vol. 1, 1972.
- [4] ASM Handbook
Tribology.
Vol. 18, ASM International, 1992.
- [5] J.A.Pask
An Atomistic Appraoach to the Nature and Properties of Materials
J.A Pask, New York, 1967.
- [6] Selecting Material For Wear Resistance, Guide to Selecting Engineering Materials.
Revista "Advanced Material & Process".
1990.
- [7] Anual book of ASTM standars
"Metals test methods and analytical procedures",
Norma ASTM "Wear and erosion; Metal corrosion", 1993.

CAPÍTULO II.

2.1.- DESGASTE.

2.1.1.- Revisión histórica.

Los fenómenos de la fricción y el desgaste son tan antiguos como lo es la raza humana. En tiempos del Paleolítico, el fuego se generaba al frotar dos pedazos de madera o mediante el choque de piedras flint. En el Mesolítico se utilizaron los primeros rodamientos hechos de madera para postes de puertas. Taladros, tornos de alfarería, trineos con ruedas para transportar cargas pesadas, son algunos de los ejemplos que revelan contribuciones tribológicas importantes de los Egipcios y Sumerianos. También existen evidencias del uso de lubricantes durante ese periodo ^[1].

Sin embargo, no fue sino hasta el renacimiento cuando Leonardo Da Vinci (1452-1519) realizó contribuciones importantes sobre desgaste y fricción. Leonardo midió la fuerza friccionante en cuerpos con deslizamiento en planos horizontales e inclinados. El encontró que la fuerza friccionante depende de la fuerza normal que actúa sobre los cuerpos y que es independiente del área de contacto aparente. También diferenció entre la fricción por deslizamiento y por rodamiento. Leonardo sabía los efectos de los lubricantes sobre la fricción y el desgaste, y todo parece indicar que introdujo el coeficiente de fricción, como el cociente de la fuerza friccionante y la carga normal ^[2].

Aproximadamente dos siglos después Guillermo Amontons confirmó de manera independiente lo que Leonardo Da Vinci había planteado, “la fuerza friccionante depende de la fuerza normal que actúa sobre los cuerpos y es independiente del área de contacto aparente”. Tanto Leonardo como Amontons, encontraron valores constantes para el coeficiente de fricción (1/3 y 1/4 respectivamente), independientemente del material ^[3]. A partir de ese momento, un sin número de científicos han formado parte de la historia del desarrollo de los conocimientos que se tienen hoy en día respecto a la fricción, el desgaste y la lubricación. Una revisión excelente de la historia de la fricción, desgaste y lubricación es presentada por Dowson ^[4]

2.1.2.- Definición.

Los daños que se presentan en los componentes estructurales y/o equipos de servicio, tienen diferentes orígenes y/o causas. Sin embargo, uno de los más relevantes e importantes son los daños causados por desgaste.

La tribología es una palabra que proviene del vocablo griego “tribo” que literalmente significa frotar o rozar. De ahí que la tribología se puede definir como el estudio del rozamiento o

frotación. Esta palabra fue utilizada formalmente por primera vez por el comité gubernamental de Inglaterra ^[3], dirigido por Jost en el año de 1966. La tribología fue definida como “La ciencia y tecnología de la interacciones de superficies con movimiento relativo”. La tribología involucra el estudio de la fricción, el desgaste y la lubricación, así como las aplicaciones tecnológicas de los conocimientos tribológicos. La importancia del desarrollo de la tribología a nivel industrial se ve reflejada en los diferentes estudios económicos que realizan países industrializados como: Inglaterra, Alemania, Japón y Estados Unidos ^[5].

La fricción y la lubricación no son propiedades intrínsecas de los materiales en operación, sino de los sistemas ingenieriles en operación. La fricción es un fenómeno que se caracteriza por la pérdida de energía mientras que el desgaste es un fenómeno que se caracteriza por la pérdida de masa. La DIN 50320 define al desgaste como “la pérdida progresiva de material de la superficie de un cuerpo sólido debido a una acción mecánica” ^[4]. El desgaste rara vez es catastrófico, más bien se refleja en cambios dimensionales causando problemas como vibración, desalineamiento, etc., y consecuentemente una disminución de la eficiencia de las condiciones de operación ^[6]. Al presentarse el desprendimiento de pequeñas partículas debido al desgaste en sistemas con claros y/o tolerancias pequeñas, puede representar un mayor problema que los cambios dimensionales de los componentes.

El desgaste se presenta en diversas situaciones, comenzando desde los fenómenos naturales de la tierra como la lluvia, viento, etc., que ocasionan erosión, modificación de cortezas y ecosistemas debido al desgaste que estos ocasionan. También se presentan en elementos de máquinas e incluso en el cuerpo humano ^[1]. Debido a la gran variedad de situaciones en las que se puede presentar el desgaste, es necesario definir cada uno de los diversos tipos de desgaste que se presentan. Para ello, es necesario tener una sistema de análisis denominado:

Tribosistema: (o sistema tribo - tecnológico) Es un sistema de análisis que sirve para identificar la naturaleza del mecanismo de desgaste presente. Su propósito es transformar y/o transmitir tecnológicamente las entradas en salidas. En este ámbito se entiende por **entrada** a la variable que inicialmente gobierna al tribosistema para realizar una función específica bien sea esta trabajo, movimiento, masa, información, etc. Sin embargo, por la naturaleza propia de todo tribosistema dichas variables sufren perturbaciones de diferentes magnitudes, por lo cual a las variables resultado de estas perturbaciones se les considera **salidas**. De este modo se tiene una referencia para determinar la funcionalidad del tribosistema.

La relación existente entre las entradas y las salidas, se puede considerar la función técnica del tribosistema o *descripción funcional*, figura 2.1. Las entradas y salidas se pueden clasificar en: movimiento, trabajo (mecánico, hidráulico, neumático, etc.), material o masa e información. Ejemplos de entradas indeseables son: las vibraciones, calor, humedad, etc. La fricción y el desgaste resultan en salidas indeseables como ruido, calor, partículas y vibración. La descripción funcional de los tribosistemas se debe complementar mediante una descripción estructural, es decir se tiene una relación entre la parte interna y la parte externa del sistema. *La descripción estructural*, analiza las estructuras internas del tribosistema y sus elementos, considerando sus propiedades e interacciones. La estructura de un tribosistema, generalmente es cambiada por la fricción y el desgaste con el paso del tiempo. Esto puede resultar en un cambio funcional del sistema, el cual puede ser deseable o no.

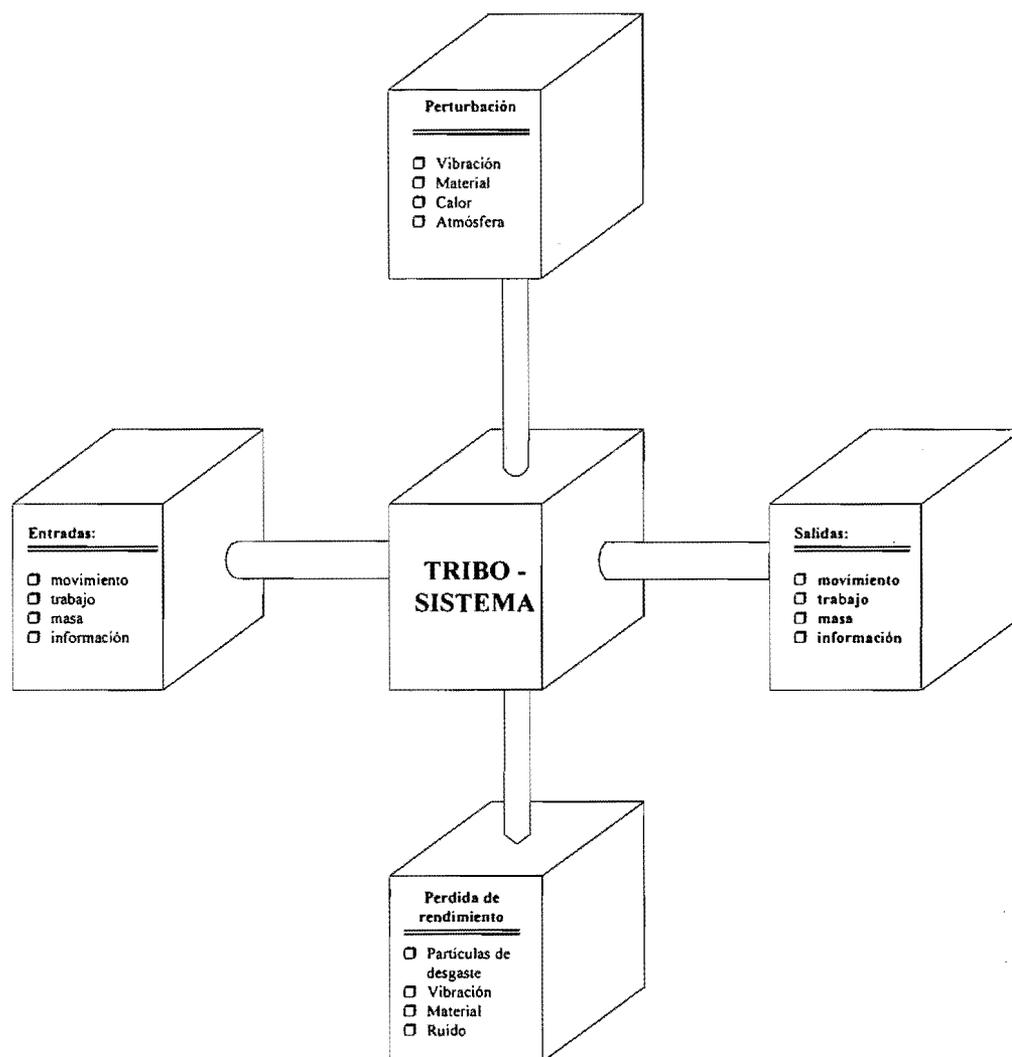


Figura 2.1.- Descripción general de las entradas y salidas de un tribosistema ⁽¹⁾.

La figura 2.2, muestra la forma simplificada de un tribosistema según la norma DIN 50320. La estructura de un sistema es determinado por sus elementos, sus propiedades y sus interacciones.

TRIBOSISTEMA

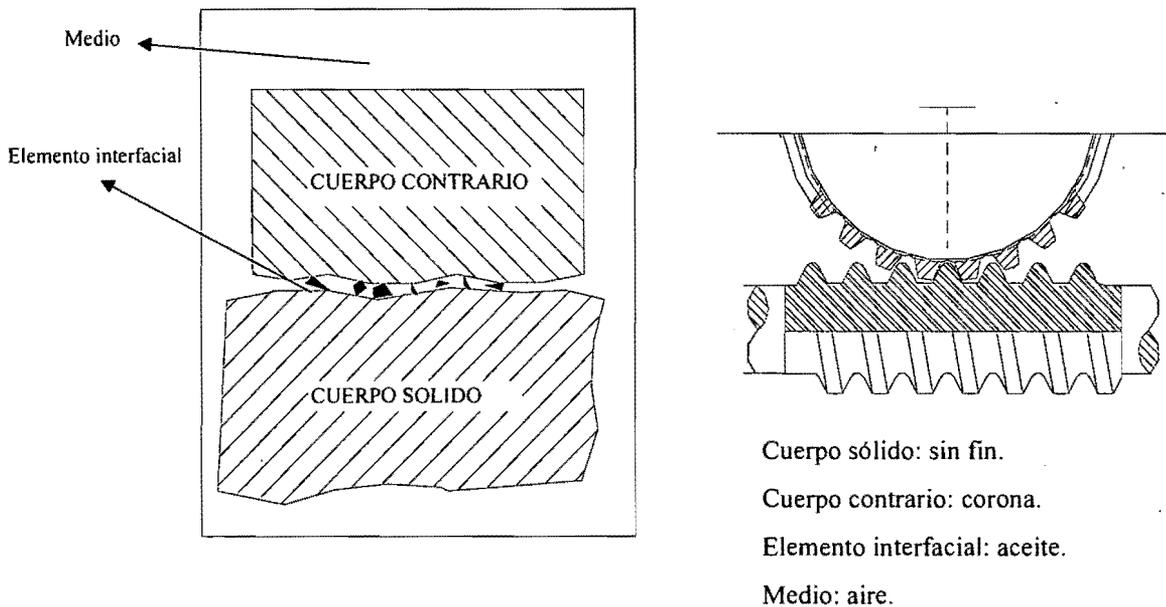


Figura 2.2.- Representación esquemática de los elementos de un tribosistema ^[1].

Normalmente un tribosistema consta de 4 partes:

1. Cuerpo sólido.
2. Cuerpo contrario.
3. Elemento interfacial.
4. Medio.

El cuerpo contrario puede ser un sólido, un líquido, un gas o una mezcla de estos. Los lubricantes generalmente absorben sólidos, líquidos, gases o una combinación de ellos, los cuales forman capas que funcionan como elementos interfaciales en los tribosistemas. Como un caso muy especial el elemento interfacial puede no presentarse.

La acción de los elementos o la interacción entre ellos puede variar bastante. La figura 2.3, muestra diferentes tipos de acción sobre la superficie de un cuerpo sólido. De acuerdo al movimiento (deslizamiento, rotación, oscilación, impacto y flujo), el proceso de desgaste puede ser clasificado en: desgaste por deslizamiento, por rotación, por oscilación, por impacto y por erosión, dependiendo de la cinemática del sistema. Otros criterios consideran el estado físico del cuerpo contrario, si es sólido o líquido, o el ángulo de contacto. O también basándose en el elemento interfacial, por el cual los procesos de desgaste se clasifican en secos y lubricados.

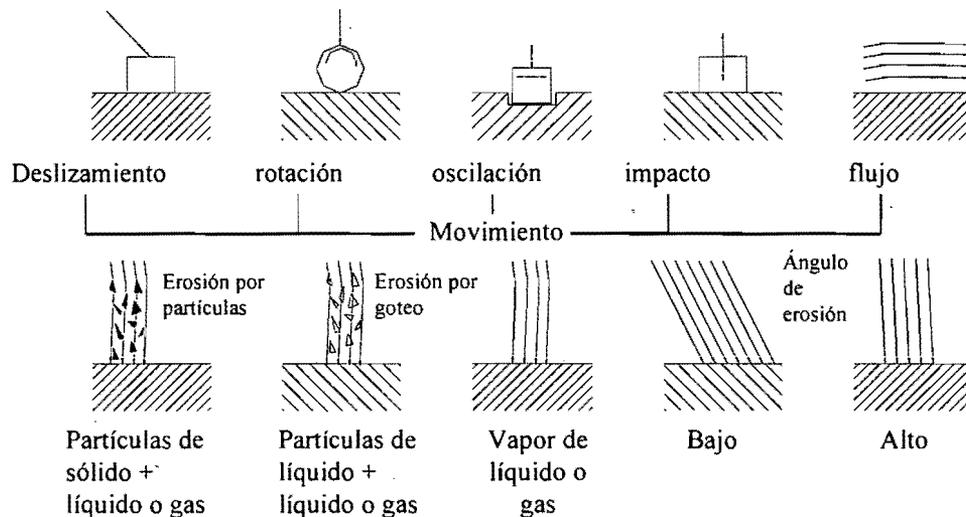


Figura 2.3.- Clasificación de los procesos de desgaste de acuerdo al modo de desgaste ¹⁴¹.

La primera observación importante del comportamiento de los metales en desgaste, es que bajo ciertas condiciones de carga el desgaste es relativamente leve, las superficies son desgastadas ligeramente y las rugosidades de las superficies no son conductoras eléctricas. Hirst, refiere a este tipo de desgaste como “desgaste medio”. Éste se presenta durante el deslizamiento de superficies de contacto cubiertas por óxidos o capas formadas debido a la reacción triboquímica. Por encima de este intervalo el desgaste se incrementa cientos o miles de veces, las superficies ahora son muy rugosas y conductoras de electricidad; a este tipo de desgaste se le conoce como “desgaste severo”. Éste tipo de desgaste se refiere a contactos metal-metal, o bien de materiales donde se presente adhesión, deformación plástica, formación de uniones y transferencia de material.

2.1.3.- Descripción matemática.

A pesar de que durante varias décadas se han realizado varios estudios sobre el fenómeno de desgaste, éste sigue siendo una de las áreas de mayor interés dentro de la tribología. Dowson ¹⁴¹ menciona que el dominio de la investigación y estudios de desgaste dentro de la tribología, se extenderán hasta los primeros años del siglo entrante. Durante los esfuerzos realizados con el fin de describir matemáticamente este fenómeno, se observó que la modelación del desgaste es muy difícil debido a que intervienen diferentes factores microscópicos como lo son la rugosidad y la no homogeneidad de la superficie, los cuales generalmente se desprecian en la mecánica clásica y deben ser considerados en la modelación.

Hace más de 30 años, Holm ¹⁷¹ y posteriormente Archard ¹⁸¹ obtuvieron un modelo físico muy sencillo del desgaste:

$$\dot{W} = kL/H \quad \dots 2.1$$

donde la razón de desgaste \dot{W} es proporcional a la carga L e inversamente proporcional a la dureza del material H . k es la constante adimensional comúnmente conocida como "coeficiente de desgaste" el cual puede variar de 10^{-1} a 10^{-10} . En su época, este modelo indudablemente llevo a aproximaciones tanto teóricas como experimentales, a pesar de que en algunos casos la conducta del desgaste no obedecía lo estipulado por dicho modelo. Un ejemplo de ello es que en algunos experimentos realizados se encontró que la relación razón de desgaste-carga, no es necesariamente lineal ^[9]; o bien que algunos materiales presentan menor resistencia al desgaste que otros, aun cuando su dureza sea mayor ^[10]; también se observó que el desgaste es dependiente del tiempo ^[11]. Desafortunadamente no se han propuesto modelos que consideren estos efectos y más aún modelos que sean aceptados por todos, por lo que el modelo de Archard y algunos otros modelos empíricos son actualmente usados.

Rabinowicz ^[12] realizó un análisis cuantitativo de diferentes materiales sometidos a desgaste por deslizamiento, Suh ^[13] realizó estudios en mecanismos de desgaste donde se involucran adhesión y/o abrasión y/o fatiga de la superficie, dando como resultado partículas de desgaste en forma de laminillas, por lo cual a este mecanismo se le denominó delaminación. Quinn ^[14] en desgaste por oxidación y algunos otros tribologistas en otros tipos de mecanismos de desgaste. Halling ^[15] modificó el modelo de Archard al incluir ciertas modificaciones sobre: la rugosidad de la superficie, deformación elástica o plástica, relación esfuerzo-deformación y criterio de falla para obtener:

$$\dot{W} = k^* L/H^* \quad \dots 2.2$$

donde k^* y H^* son el coeficiente de desgaste y la propiedad del material modificados respectivamente. El problema que presenta este modelo es que aun bajo ciertas condiciones de operación, una constante de desgaste o de la razón de desgaste, no satisface las tres etapas observadas en un proceso de desgaste: etapa de inicio, etapa constante y etapa acelerada, figura 2.4.

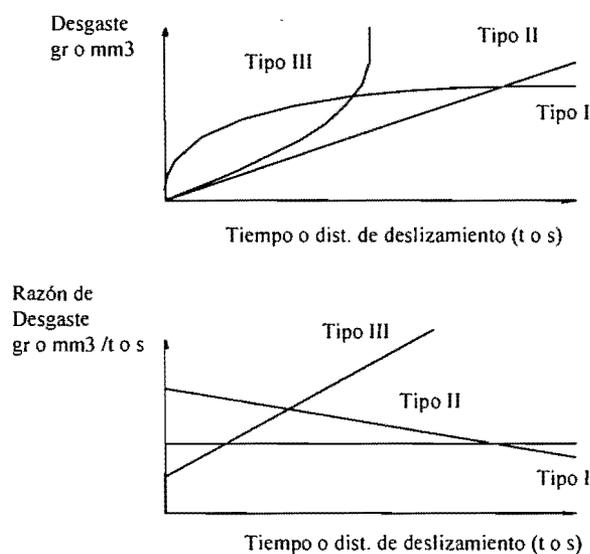
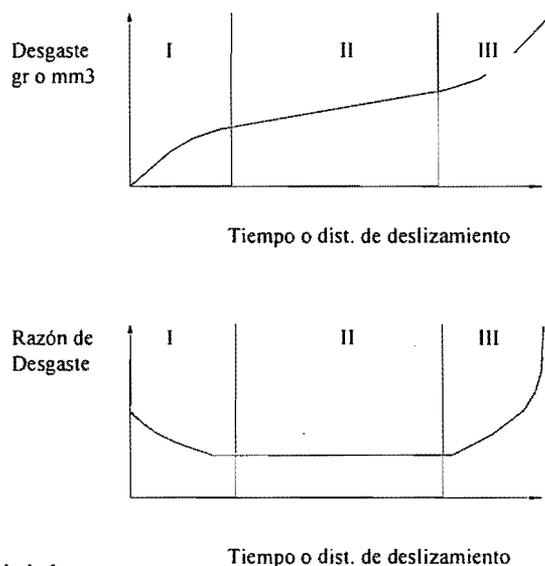


Figura 2.4.- Tres conductas del desgaste ^[15]

La figura 2.5 muestra una curva típica de desgaste-tiempo, la cual consiste en tres tipos de regímenes diferentes: régimen inicial de desgaste, régimen estable de desgaste y régimen acelerado de desgaste. En un proceso de desgaste, el régimen inicial obedece a una función desgaste-tiempo que pertenece al tipo I. En este caso el efecto de desgaste es benéfico en vez de ser nocivo puesto que las características de la superficie del material son propicias para adaptarse a las condiciones del tribosistema. Durante el proceso de desgaste el tipo II generalmente presenta un régimen estable. En este caso la función desgaste-tiempo es lineal, pero el efecto de la carga normal o de la dureza no siempre son una simple relación lineal. La transición del régimen estable al régimen acelerado, se puede atribuir al cambio de mecanismo de desgaste o bien al rompimiento de la capa de lubricación debido al aumento de temperatura en la superficie hasta un valor crítico, o también por contaminantes y algunos otros factores del tribosistema. Puesto que en el tercer régimen el desgaste generalmente se incrementa más allá de un valor de desgaste crítico del equipo o de la maquinaria, se observa que en estos casos se presentan cuarteaduras o ralladuras de la superficie.



- I.- Régimen de inicial.
- II. Régimen estable.
- III.- Régimen acelerado

Figura 2.5.- Función típica desgaste tiempo ¹¹⁵⁾

Debido a estas situaciones, se siguen proponiendo diversos modelos físicos con la finalidad de lograr una mejor interpretación del fenómeno de desgaste. A continuación se presenta un modelo que puede satisfacer las etapas presentes en proceso de desgaste, sin embargo como se verá posteriormente, la similitud con los modelos convencionales vistos anteriormente, es muy grande.

El siguiente modelo ¹¹⁶⁾se plantea a través de tres pasos principales:

1) Primeramente se hace un postulado acorde al concepto físico de que el campo de esfuerzos cortantes inducido por la fuerza friccionante de las asperezas de la superficie, es un agente

que genera desgaste, y la distribución del flujo resistivo o de resistencia cerca de la superficie, es un agente de resistencia antidesgaste.

2) Segundo, se definen dos términos matemáticos que representen el agente que genera el desgaste y el agente que se opone al mismo, y se establece un modelo matemático.

3) Tercero, se estudia y se compara este modelo con los ya existentes. El mecanismo de desgaste de adhesión pura presentado por Archard en su modelo es el elegido para validar este modelo.

2.1.3.1.- MODELO DE DESGASTE DINÁMICO.

La figura 2.6 y 2.7 muestran un sistema tribológico sometido a una carga normal L y a una velocidad de deslizamiento U , en la zona deformada elástica y plásticamente, de acuerdo a la mecánica de los medios continuos, tanto el campo de esfuerzos $\tau_i(x,y,z)$ y la distribución del flujo resistivo del material $\delta_i(x,y,z)$, son funciones del tiempo y del espacio. El campo de esfuerzos cortantes es el agente causante de desgaste y la distribución del flujo resistivo del material es el agente antidesgaste o resistente al desgaste. Así se postula que la razón de desgaste es directamente proporcional a un factor o término de fuerzas I , el cual se genera por el campo de esfuerzos cortantes τ_i y es inversamente proporcional al término resistivo S , el cual se relaciona con la distribución del flujo resistivo δ_i .

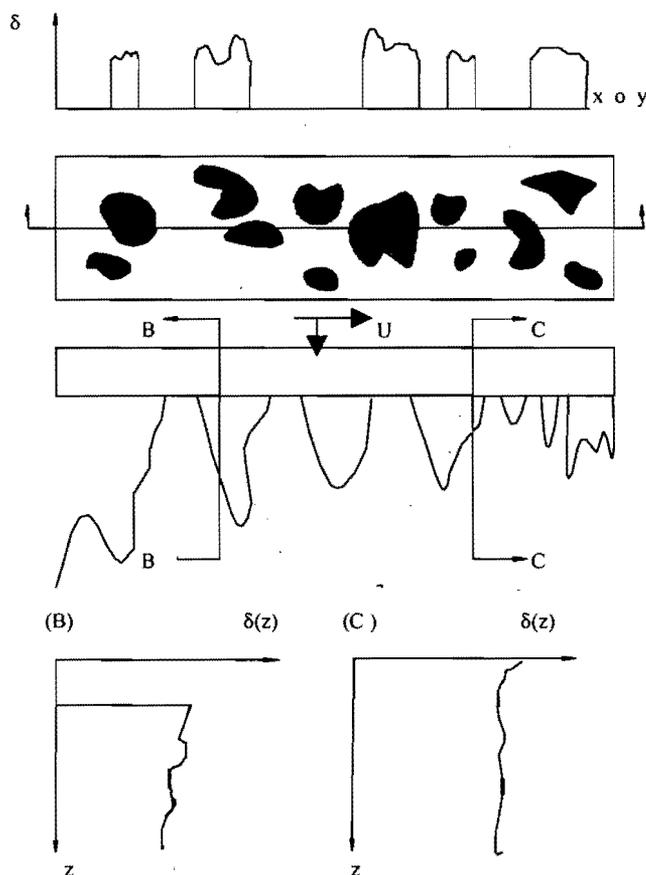


Figura 2.6.- Distribución del flujo resistivo del material ^[16].

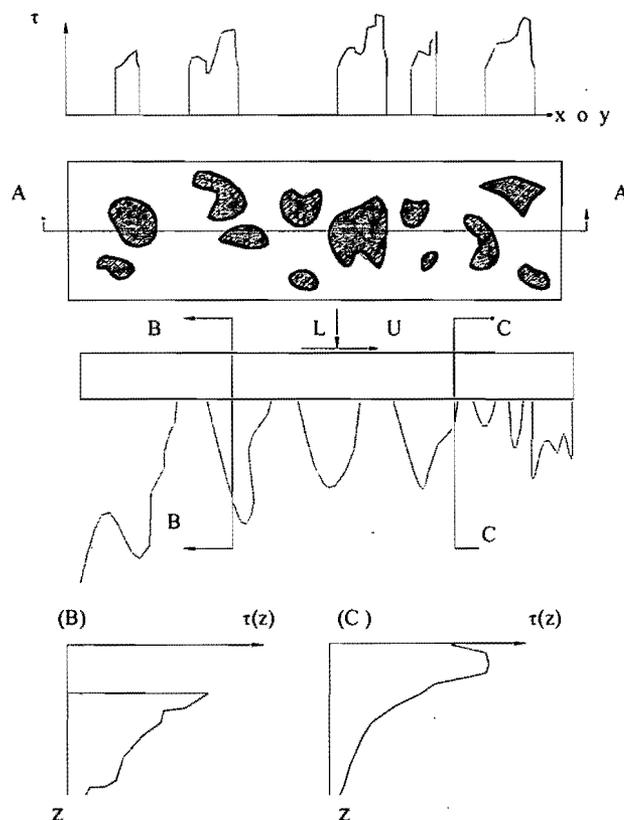


Figura 2.7.- Distribución del esfuerzo cortante ocasionado por la carga ^[16].

Ante este postulado surgen 2 preguntas: 1) ¿cómo determinar I y S ? y 2) ¿tiene sentido?. Ciertamente tanto la medición como el análisis del campo de esfuerzos cortantes y la distribución del flujo resistivo para casos generales son tareas involucradas, sin embargo, para algunos casos simples el término de fuerzas I , se puede relacionar con la carga normal o con la fuerza friccionante; por otra parte el término resistivo S , se puede relacionar con algunas propiedades medibles del material como lo es la dureza o la resistencia a la cedencia.

Para apoyar este postulado se compara con los modelos ya existentes, de manera específica con el modelo de Archard. Tres características estadísticas de las capas cerca de la superficie serán descritas, estas incluyen: la razón de desgaste, la resistencia antidesgaste y la fuerza cortante promedio^o.

2.1.3.1.1.- Desgaste y razón de desgaste.

La variación del volumen del material dentro de unos intervalos de tiempo prescritos entre t_i y t_{i+1} , los cuales pueden ser minutos o segundos, se presentan en la figura 2.8, y puede ser calculado acorde a la distribución de la rugosidad en la superficie como:

^o Parte del desarrollo de este modelo se describe en el apéndice

$$V_i - V_{i+1} = A \int_0^{\infty} \phi_i(z) dz - A \int_0^{\infty} \phi_{i+1}(z) dz \quad \dots 2.3$$

Donde A es el área cuerpo contrario-cuerpo sólido que a nivel macroscópico esta en contacto directo y es denominada "área de contacto aparente" y $\phi_i(z)$ es la función probabilística^o acumulativa dependiente del tiempo de la distribución de la altura de las asperezas en un tiempo t_i .

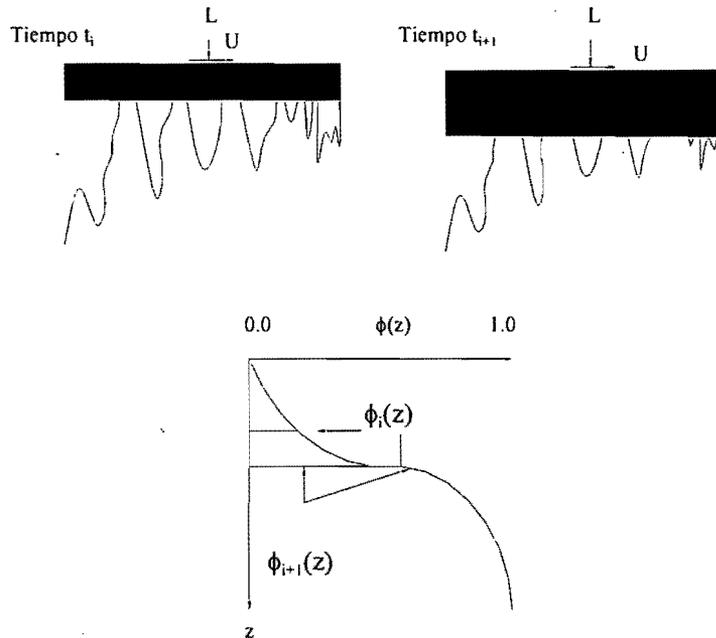


Figura 2.8.- Variación volumen de material y desgaste ^[16].

El desgaste W, no siempre es igual a la variación del volumen del material cuando se consideran la deformación plástica, transferencia del material y la formación de películas; sin embargo, este puede ser expresado como:

$$W_i = V_i - V_{i+1} - (V_p - V_t - V_f) \quad \dots 2.4$$

Donde V_p , V_t y V_f son los cambios de volumen debido a la deformación plástica, transferencia del material y a la formación de películas respectivamente. Estos valores pueden ser determinados tanto experimental como teóricamente, por lo que el término entre paréntesis de la ecuación (2.4) se puede reemplazar por un valor global C y W se puede describir como:

$$W_i = A \int_0^{\infty} \phi_i(z) dz - A \int_0^{\infty} \phi_{i+1}(z) dz - C \quad \dots 2.5$$

y la razón de desgaste, desgaste por unidad de deslizamiento, se puede expresar como:

$$\dot{W} = W / U \Delta t \quad \dots 2.6$$

^o Nota.- Se describe en el apéndice

$$\dot{W} = [A \int_0^{\infty} \phi_i(z) dz - A \int_0^{\infty} \phi_{i+1}(z) dz - C] / U \Delta t \quad \dots 2.6a.$$

donde U es la velocidad de deslizamiento y Δt es un pequeño periodo de tiempo ($t_{i+1} - t_i$).

2.1.3.1.2.- Resistencia antidesgaste⁹.

La resistencia antidesgaste S, se define como la resistencia promedio del material en una capa de espesor h cerca de la superficie, que matemáticamente puede definirse como:

$$S = \frac{1}{Ah} \int_0^h \iint \delta_i(x,y,z) dx dy dz \quad \dots 2.7$$

donde h es el espesor del material donde se deforma elástica y plásticamente bajo la aspereza sometida a carga y este es del orden del radio promedio de las asperezas de contacto. El flujo resistivo $\delta_i(x,y,z)$, representa la capacidad del material para resistir el flujo plástico en un punto (x,y,z) en un tiempo t_i . Esta es una propiedad microscópica y puede ser relacionada con la microdureza o con la resistencia a la cedencia del material.

Considerando los efectos de la heterogeneidad de la superficie del material, la figura 2.6 muestra variaciones posibles del flujo resistivo δ , para el contacto de una rugosidad a una profundidad determinada.

Puesto que la geometría del área de contacto total se constituye por n_i ($i=1,2,3,\dots,m$) asperezas, S será la sumatoria de la integral de cada área de contacto de cada aspereza, y entonces (7) queda:

$$S = \frac{1}{Ah} \int_0^h \left(\sum_j \int_{A_j} \delta_i(x,y,z) dA_j \right) dz$$

$$S = \frac{1}{h} \int_0^h \phi_i(z) \bar{\delta}_i(z) dz \quad \dots 2.8$$

donde A_j es el área de la aspereza j con una profundidad z, y:

$$\bar{\delta}_i(z) = \sum_j \iint_{A_j} \delta_i(x,y,z) dA_j / \sum A_j \quad \dots 2.9$$

es el flujo resistivo promedio del material a una profundidad z. En el caso de materiales homogéneos el flujo resistivo puede ser la resistencia a la cedencia. Como se observa en la ecuación (2.8), la resistencia antidesgaste combina tanto las propiedades geométricas (A_j) como

⁹ Nota.- Se describe en el apéndice.

las propiedades mecánicas del material (δ_i) dentro del término de la integral. Al introducir $\phi_i(z)$, S se vuelve dependiente tanto del tiempo como del desgaste, puesto que como proceso de desgaste tanto la rugosidad de la superficie como la resistencia del material cambian. El flujo resistivo $\delta(z)$ puede incrementar debido al trabajo de endurecimiento o bien disminuir debido a la iniciación y propagación de grietas. Esto también puede ocurrir por degradación térmica. Experimentalmente se ha demostrado que el flujo resistivo en la capa superficial puede ser más alto o menor que en el material mismo. La relación de $\delta(z)$ con diversos aspectos térmicos y mecánicos es un tema por separado que no se tratará en este estudio.

2.1.3.1.3.- Fuerza cortante promedio^o.

Puesto que el desgaste primeramente es causado por los esfuerzos cortantes inducidos por las fuerzas friccionantes de las asperezas sobre una capa delgada cerca de la superficie, resulta razonable proponer o postular que la razón de desgaste es proporcional al promedio de la fuerza cortante que se presenta a través de una profundidad h. Esta profundidad es la misma que la utilizada anteriormente para definir S. La fuerza cortante en una capa con una profundidad z se puede expresar por:

$$\iint \tau_i(x,y,z) dx dy \quad \dots 2.10$$

Donde $\tau_i(x,y,z)$ es el esfuerzo cortante en dirección del movimiento en un tiempo t_i , éste se puede analizar por la teoría de elasticidad y plasticidad, e incluir el efecto de la concentración de esfuerzos. Así la fuerza cortante promedio I, se define como la fuerza cortante promedio sobre una capa delgada de espesor h:

$$I = \frac{1}{h} \int_0^h \left(\iint \tau_i(x,y,z) dx dy \right) dz \quad \dots 2.10a$$

En contactos rugosos, la distribución de $\tau_i(x,y,z)$ sobre una capa z es discontinua, puesto que esta se corta a lo largo a través de los valles. Para estos casos la fuerza cortante en z, se puede obtener por la sumatoria de los esfuerzos cortantes sobre todas las áreas de las asperezas sobre esa misma la capa. Así la fuerza cortante promedio para contactos rugosos se puede expresar como:

$$I = \frac{1}{h} \int_0^h \left(\sum_{A_j} \iint \tau_i(x,y,z) dA_j \right) dz \quad \dots 2.11$$

Ahora la fuerza cortante en z (el término entre paréntesis) de la ecuación (2.11), se puede representar por un promedio de esfuerzos cortantes sobre todas las áreas de las asperezas en z, $\tau_i(z)$, por $A \cdot \phi(z)$, donde A es el área aparente y $\phi_i(z)$ es la función probabilística acumulativa

^o Nota.- Se describe en el apéndice.

dependiente del tiempo de la distribución de las alturas de las asperezas en un tiempo t_i . Así la fuerza cortante para un contacto rugoso queda:

$$I = \frac{A}{h} \int_0^h \phi_i(z) \cdot \bar{\tau}_i(z) dz \quad \dots 2.12$$

y el esfuerzo cortante promedio se puede expresar como:

$$\bar{\tau}_i(z) = \sum_j \iint_{A_j} \tau_i(x,y,z) dA / \sum_j A_j \quad \dots 2.13$$

Es importante hacer notar que la fuerza cortante promedio I , utilizada en el modelo de desgaste dinámico, es dependiente tanto del tiempo como del desgaste, por que tanto el campo de esfuerzos cortantes como la geometría de las asperezas cambian conforme avanza el tiempo y el desgaste. Puesto que la distribución de los esfuerzos cortantes depende obviamente del coeficiente de fricción, la fuerza cortante promedio será función de la fuerza friccionante y el efecto del coeficiente de fricción para este presente modelo se considera más significativo que el efecto de la concentración de esfuerzos. La figura 2.7, ilustra la variación de los esfuerzos cortantes de dos secciones (BB y CC) a través de una determinada profundidad. Este comportamiento que se muestra o plantillas de esfuerzos cortantes pueden ser dependientes del tiempo.

2.1.3.2.- MODELADO.

El modelo de desgaste dinámico esta basado en el postulado de que dentro o en una capa delgada cerca de la superficie, la razón de desgaste es proporcional a la fuerza cortante I e inversamente proporcional a la resistencia antidesgaste S y puede ser expresado como:

$$\dot{W} = cI/S \quad \dots 2.14$$

donde \dot{W} es el desgaste por unidad de deslizamiento. En el sistema SI, la razón de desgaste, la fuerza cortante promedio y la resistencia antidesgaste se expresan en m^3/m , N y N/m^2 respectivamente. La constante c es adimensional y puede ser determinada experimental o teóricamente.

Dentro de este postulado con las definiciones de fuerza cortante promedio I y la resistencia antidesgaste S , se propone el siguiente modelo:

$$\dot{W} = cI/S$$

$$I = A \int \phi(z) \bar{\tau}(z) dz / h \quad \dots 2.15$$

$$S = A \int \phi(z) \bar{\delta}(z) dz / h$$

el cual constituye un sistema de 3 ecuaciones con condiciones iniciales:

$$\begin{aligned} W(0) &= 0 \\ I(0) &= 0 \\ S(0) &= 0 \end{aligned} \quad \dots 2.16$$

En este modelo dinámico propuesto es importante hacer énfasis en las características de la función $\phi(z)$ para una superficie de desgaste. La parte plana de la parte superior de una rugosidad no es totalmente suave como se puede ver en la figura 2.9, ésta contiene microasperezas que presentan una verdadera área de contacto nanoscópica. La verdadera área de contacto puede ser determinada por el cociente de la carga normal y la dureza del material. El cociente del área real y el área aparente es $\phi_r = A_r/A$ y generalmente es muy pequeño. La función probabilística acumulativa de la distribución de la altura de las asperezas $\phi(z=0)$ tal y como se determina por perfilometría, es mayor que ϕ , debido a que el perfilómetro no alcanza a medir las rugosidades nanoscópicas.

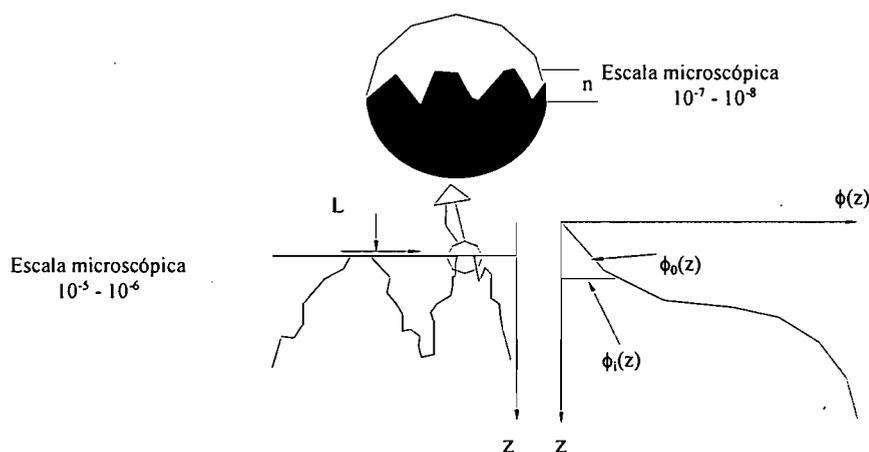


Figura 2.9.- Vista nanoscópica de la superficie ^[16].

Para un desgaste por adhesión puro, la fuerza cortante promedio I , se puede obtener de acuerdo a su definición como:

$$I = \frac{A}{h} \int_0^h \phi_i(z) \cdot \bar{\tau}_i(z) dz$$

$$I = P(f) \quad \dots 2.17$$

donde ahora I es función de la fuerza friccionante $P(f)$. Ahora bien puesto que la fuerza cortante promedio en una capa superdelgada esta dada por:

$$I_{h \rightarrow 0} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{A}{h} \int_0^h \phi_i(z) \cdot \bar{\tau}_i(z) dz$$

$$I_{h \rightarrow 0} = A \cdot \phi_r \cdot \tau(0) = F \quad \dots 2.18$$

donde $I_{h \rightarrow 0}$ se obtiene mediante el área de contacto multiplicada por el esfuerzo cortante generado sobre la superficie, $A \cdot \phi_r \cdot \tau(0)$, o bien por la fuerza friccionante, F . Por lo tanto la ecuación (2.17) para la condición estática se puede simplificar como la fuerza friccionante F por una función $p(f)$, es decir:

$$I = P(F) = F \cdot p(f) \quad \dots 2.19$$

donde la función $p(f)$ es igual a uno (1.0) cuando h se aproxima a cero (0.0). La resistencia antidesgaste se define como:

$$S = \frac{1}{h} \int_0^h \phi_i(z) \bar{\delta}_i(z) dz \quad \dots 2.20$$

para un material homogéneo, $\bar{\delta}_i$ es una constante δ , por lo que la resistencia antidesgaste es el producto del valor promedio $\bar{\phi}$ y δ , es decir en el estado estático $\bar{\delta}_i$ se incrementa gradualmente para ser una constante y se define como:

$$S = \bar{\phi} \delta = qH \quad \dots 2.21$$

que como se propuso, en el caso más simple δ puede ser la dureza o la resistencia a la cedencia.

Para un mecanismo de desgaste de adhesión pura y bajo condiciones de desgaste estático (etapa estable del proceso de desgaste), el coeficiente de fricción es una constante, por lo que el modelo de Archard se puede deducir al sustituir (2.19) y (2.21) en la ecuación (2.14), para obtener:

$$\dot{W} = cI/S \quad \text{o} \quad \dot{W} = cp(f)/qH, \quad \text{o bien:}$$

$$\dot{W} = kL/H \quad \dots 2.22$$

que en sí es el modelo propuesto por Archard, ecuación (2.1), y además apoya lo estipulado en la ecuación (2.14) resolviendo así la primera pregunta que se tiene sobre este modelo.

De las definiciones precedentes de desgaste, resistencia al desgaste, y fuerza cortante promedio; se puede observar que las tres dependen de la función probabilística acumulativa dependiente del tiempo $\phi_i(z)$, por lo que por transitividad se deduce que estas ahora son dependientes del tiempo. Más aún la resistencia antidesgaste y la fuerza cortante promedio son dependientes del desgaste, debido a que en cuanto el desgaste aumenta, no solo la resistencia del material varía sino que también el campo de esfuerzos cortantes variará en varias capas, lo que responde a la segunda pregunta formulada en este modelo.

Con esto el modelo de desgaste dinámico se puede replantear como:

$$\begin{aligned} & \bullet \\ W &= cI/S \\ I &= G_1(W,t) \quad \dots 2.23 \\ S &= G_2(W,t) \end{aligned}$$

el cual puede ser transferido a una ecuación diferencial no lineal dependiente del tiempo y del desgaste

$$\bullet \\ W = cI/S = \frac{c G_1(W,t)}{G_2(W,t)} \quad \dots 2.24$$

donde las funciones dependiente del desgaste y del tiempo G_1 y G_2 , se pueden obtener al saber como varían $\phi(z)$, $\bar{\delta}(z)$ y $\bar{\tau}$ respecto al tiempo y al desgaste. Para casos específicos G_1 y G_2 son tan simples como una función lineal de desgaste o tiempo, sin embargo, la ecuación (2.24) también puede producir algunas conductas no lineales.

2.2.- MECANISMOS DE DESGASTE.

El desgaste se refleja por pérdida de material o por daño de la superficie. Los daños y pérdidas de la superficie sólo se puede presentar por 3 causas:

1. por fundición,
2. por disolución química, o
3. por separación física de la superficie.

Sin embargo, con el objeto de establecer de manera específica los mecanismos que se presentan en los diferentes procesos de desgaste se han utilizado diversos términos, los cuales generalmente son motivo de discusión. Hoy en día, no existe un catálogo para definir los diferentes términos referidos a los mecanismos de desgaste, y más aún, no se han estandarizado por lo que varían de acuerdo a cada autor.

Mecanismo de desgaste:	
Burwell y Strang	abrasión, adhesión, corrosión, fatiga de la superficie, fretting (oscilación - vibración), erosión y cavitación
Jahanmir	adhesión, abrasión, delaminación, fretting (oscilación - vibración), erosión, impacto, cavitación, fatiga de la superficie, corrosión, difusión y por contacto eléctrico.
Goldfrey	adhesión, adhesión severa, abrasión, delaminación, fretting (oscilación - vibración), erosión, impacto, cavitación, fatiga, corrosión, electrocorrosión, descarga eléctrica y por pulido.
Rice	adhesión, abrasión, fatiga, corrosión u oxidación y eléctrico.
DIN 50320	adhesión, abrasión, fatiga de la superficie y reacción triboquímica.

Tabla 2.1.- Clasificación de los mecanismos de desgaste.

La tabla 2.1^{III}, presenta diferentes términos que manejan diferentes autores al hablar de los mecanismos de desgaste.

Sin embargo, a pesar de la gran variedad de los términos utilizados para describir los mecanismos de desgaste, el desgaste básicamente se fundamenta en la presencia o combinación de 4 mecanismos de desgaste, tal y como lo estipula la DIN 50320:

Adhesión.- Se define como la formación y el posterior rompimiento de las uniones interfaciales que se forman en la frontera, debido a la acción mecánica de los cuerpos. Aparece a pequeñas velocidades relativas hasta de 0.2 m/s y por deformación en las áreas reales de contacto, con la subsecuente formación de micropuentes y la destrucción del material. La formación de las uniones por adhesión depende de las propiedades físicas y químicas del material, así como de los valores de carga, rugosidad y contacto entre los materiales, figura 2.10.

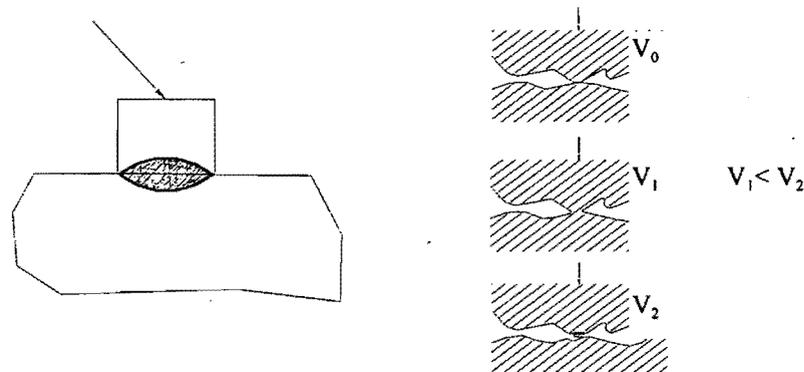


Figura 2.10.- Descripción esquemática de la adhesión ^{III}.

La adhesión es un fenómeno que resulta de la atracción de fuerzas entre dos cuerpos en contacto mutuo. La adhesión interfacial puede ser debida a uniones covalentes, iónicas, metálicas, de hidrogeno o de van der Wals, que se ven favorecidas por la deformación plástica y limpieza superficial que se presenta en los procesos de desgaste. Generalmente el cortante plástico que se presenta en las uniones, se da dentro en un material base o en ambos si la unión es muy fuerte. La ruptura de las uniones generalmente lleva a la transferencia del material desprendido al de contacto. En un principio no se generan partículas debido al desgaste, sin embargo esto puede suceder con los pasos subsecuentes. El desgaste de la interface es muy poco o no se presenta a menos que sea menos fuerte que cualquier de los materiales base.

Abrasión.- Se define como el desprendimiento del material debido al raspamiento de la superficie y a la diferencia de durezas de los materiales en contacto o bien por un medio abrasivo. De otra forma el desgaste por abrasión se debe a la presencia de partículas duras que estén adheridas o entre los cuerpos en movimiento, o también por la presencia de protuberancias en algunas de las superficies de contacto que se encuentra en movimiento relativo figura 2.11. Las partículas duras pueden ser productos de procesos donde intervenga: sílice, alumina u otros

minerales; partículas de desgaste debido al trabajo por endurecimiento, o partículas debido al medio de operación del tribosistema, i.e. polvo. Por otro lado las protuberancias como lo son las asperezas resultado del maquinado de la superficie, pueden actuar como partículas duras si es que uno de los dos cuerpos en contacto es menos duro que el otro.

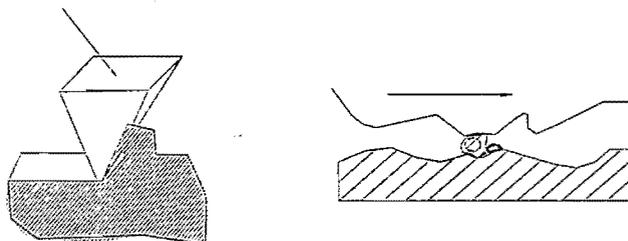


Figura 2.11.- Descripción esquemática de la abrasión (dos y tres cuerpos) ⁽¹⁾.

El desgaste abrasivo se puede clasificar por la interacción de dos o tres cuerpos, figura 2.11. En la abrasión entre dos cuerpos las partículas abrasivas se mueven libremente sobre el material, teniendo una mayor área de contacto. En la abrasión de tres cuerpos, las partículas abrasivas actúan como elementos interfaciales entre los cuerpos sólidos en contacto, sin causar desgaste severo. Debido a la abrasión se pueden presentar microsurcos, que se generan por el paso simple de una partícula abrasiva; los microcortes resultan en pérdida de material equivalente del surco o corte producido; las microgrietas ocurren cuando se presenta concentración de esfuerzos alta, debido a las partículas abrasivas, particularmente en superficies de materiales frágiles.

Fatiga de la superficie.- Se define como la fatiga y la formación de grietas sobre las regiones de la superficie debido a las cargas cíclicas y alternadas de los sistemas tribológicos, que resultan en la separación del material, figura 2.12. El contacto por deslizamiento o rodamiento de los sólidos o el impacto de sólidos y/o líquidos pueden resultar en esfuerzos cíclicos. El efecto de la fatiga se puede presentar a escala microscópica debido al contacto repetitivo de deslizamiento de las asperezas sobre las superficies de los sólidos en movimiento relativo.

La fatiga de las superficies de contacto se genera por una secuencia de deformaciones elásticas y plásticas, trabajo de endurecimiento y/o de ablandamiento, iniciación de grietas y propagación de la mismas. Las grietas se pueden originar encima o bajo la superficie. En la mayoría de los casos, este tipo de desgaste se caracteriza por el desprendimiento de partículas de desgaste, de ahí que para una determinada forma de las partículas que se generan se les ha asignado otro nombre y algunos autores lo consideran como mecanismo de desgaste, i.e. delaminación, descamación, etc.

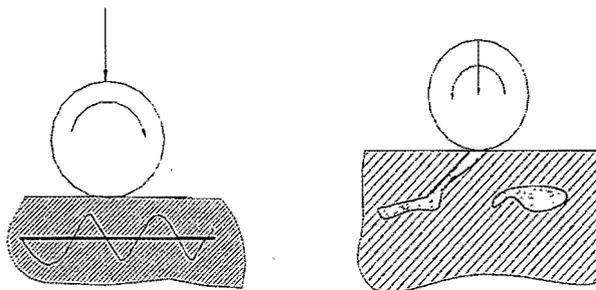


Figura 2.12.- Descripción esquemática de fatiga de la superficie ¹¹¹

Reacción triboquímica.- Se define como el producto de la reacción química iniciado por la acción tribológica, debido a las interacciones de los elementos de un tribosistema. El ambiente corrosivo puede ser gaseoso o líquido. El proceso consiste en la generación y remoción continua de las capas que se forman en la superficie debido a la reacción entre el medio de operación y las superficies de los cuerpos en contacto figura 2.13. En la presencia de atmósferas de oxígeno que son las más comunes, las partículas que se generan debido al desgaste son óxidos que se han formado en la superficie y posteriormente fueron removidos por el contacto y movimiento de las superficies una respecto a la otra. De acuerdo a los mecanismos que se pueden presentar en el desgaste por reacción triboquímica, se pueden dividir en cuatro categorías:

1. Contacto metálico entre las asperezas superficiales. Los escombros pequeños de partículas metálicas pueden oxidarse como resultado de la reacción triboquímica.
2. Las reacciones del medio con las capas metálicas superficiales reducen el contacto metálico.
3. Debido a la fatiga de la capa de reacción, ésta se rompe y genera partículas de desgaste no metálicas.
4. Las partículas producto de desgaste, las cuales pueden ser metálicas o no metálicas pueden actuar como medio abrasivo.

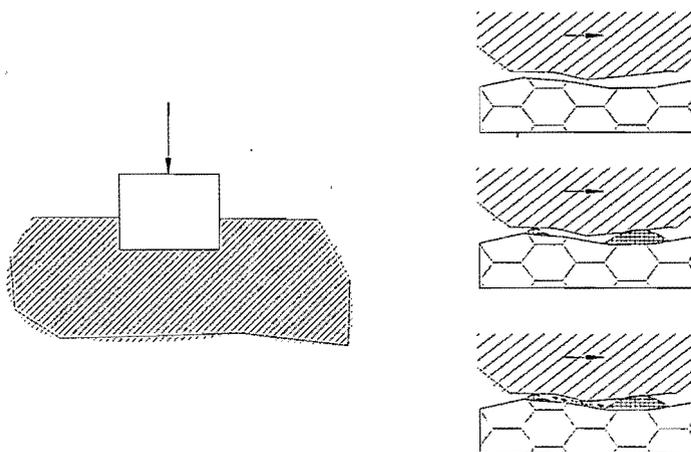


Figura 2.13.- Descripción esquemática de la reacción triboquímica ¹¹¹.

El daño de las superficies y la pérdida de masa, se origina por la presencia repetida de estos cuatro procesos diferentes. Con esto se puede observar que la reacción triboquímica se debe principalmente a la cinética de la formación de las capas superficiales y a la resistencia de estas a ser removidas.

No obstante existen otros términos que se utilizan para describir diferentes situaciones de desgaste o daño superficial, que como ya se mencionó son utilizados por diferentes autores. Algunos de ellos, sólo por mencionar son:

Delaminación.- El desgaste por delaminación se genera por la presencia simultánea de adhesión y/o abrasión y/o fatiga de la superficie. Este desgaste se caracteriza por que las partículas generadas resultado del desgaste de la superficie, tienen forma de laminillas.

Descamación.- El desgaste por descamación es característico de la fricción por rodadura. Durante la carga cíclica aparecen deformaciones internas debido a los esfuerzos generados sobre la superficie, formando microgrietas y posteriormente macrogrietas ocasionando desprendimiento de partículas en forma de escamas.

Oxidación.- Aparece en fricción por deslizamiento y por rodadura, cuando la intensidad de formación de capas de óxido es mayor que la intensidad del material removido por abrasión. Este es un proceso de absorción de oxígeno que se difunde a las regiones deformadas plástica y elásticamente, formando soluciones químicas del metal con el oxígeno, facilitando la separación de los óxidos más frágiles del material.

Picado.- El desgaste por picado aparece en fricción por rodadura. Es un proceso con lubricación que permite el desarrollo y propagación de grietas. En el desgaste por picado se distinguen tres etapas: a) fatiga de superficie, b) desarrollo y propagación de grietas como resultado de la acción del lubricante, y c) extracción de partículas metálicas que perdieron su cohesión al utilizar un lubricante.

Scuffing.- Se le llama así al mecanismo que origina daños (en algunas ocasiones llamado desgaste) en superficies en contacto por deslizamiento debido a la presencia de deformación plástica y adhesión. Este mecanismo generalmente se presenta por ausencia de lubricación, por rompimiento de la capa lubricante o por no formarse capas de óxido, lo que da lugar a un contacto directo de las asperezas superficiales y consecuentemente la presencia de scuffing(algunas veces se le conoce como galling).

Grooving.- Este tipo de desgaste se caracteriza por la penetración de partículas duras de un cuerpo contrario duro sobre uno más suave, al existir contacto por deslizamiento. Dependiendo del tribosistema se pueden involucrar adhesión, abrasión, fatiga de superficie y reacción triboquímica. Generalmente al grooving se le da el nombre de abrasión puesto que es el mecanismo de desgaste predominante.

Erosión.- Los daños superficiales que se presentan, se deben a la combinación de abrasión y fatiga de la superficie en tribosistemas abiertos. La erosión se presenta en diferentes modos como

lo son erosión rasante, erosión de chorro, erosión por lluvia, erosión-corrosión, erosión-cavitación y erosión térmica. Generalmente los daños por erosión, se originan sobre superficies sólidas debido al deslizamiento o impacto de sólidos, líquidos o una combinación de ellos. La principal diferencia entre erosión y abrasión cuando el deslizamiento o impacto es por sólidos, es el ángulo de contacto de las partículas.

Fretting.- Este tipo de desgaste se puede definir como una forma especial del desgaste triboquímico. El daño por fretting se origina en superficies con movimientos oscilatorios tangenciales pequeños respecto a la superficie. La amplitud del movimiento oscilatorio es muy pequeña, i.e. hasta 80 μm . El fretting genera la formación y crecimiento de películas de óxido sobre metales no nobles, reduciendo a contacto metal-metal. Posteriormente los óxidos se desprenden debido a delaminación.

Corrosión.- Se define como el deterioro de un material o de sus propiedades por causa de alguna reacción con el medio ambiente que lo rodea. La corrosión puede ocurrir en cualquier tipo de ambiente dependiendo del material. Existen alrededor de 57 formas de corrosión y todos los materiales están propensos a sufrir corrosión.

Cavitación.- Es la formación y actividad de burbujas en un líquido. En este contexto la palabra formar en su contexto más amplio, significa la creación de una nueva cavidad o la expansión de una ya existente a un tamaño cuyos efectos macroscópicos se observen claramente. Las burbujas que se forman pueden estar en el líquido o bien atrapadas en pequeñas grietas, o bien en la frontera de la superficie del líquido o en formas de partículas sólidas en el líquido.

La deformación plástica generalmente no se describe como un mecanismo de desgaste, sin embargo, desempeña un papel importante dentro de los mecanismos de desgaste.

Debido a las diferencias que existen y a la no estandarización de los términos usados para describir los diferentes mecanismos de desgaste, los trabajos realizados acerca de desgaste utilizan los términos más familiares para el autor, de tal modo que cubran las necesidades del estudio que se realice. El presente trabajo no es la excepción, por lo cual sólo se hará referencia a los mecanismos de desgaste involucrados en el estudio realizado, que son: adhesión, abrasión fatiga de la superficie y reacción triboquímica.

2.3.- COEFICIENTE DE DESGASTE.

Las pérdidas de material debido a desgaste ocurren por diferentes mecanismos, por lo que, como ya se mencionó, no sería extraño que el desgaste obedezca diferentes ecuaciones dependiendo el mecanismo de desgaste presente. En este caso solo se hará hincapié en los sistemas donde se presentan procesos de desgaste por deslizamiento.

Afortunadamente en los procesos de desgaste por deslizamiento los dos mecanismos de desgaste más importantes, abrasión y adhesión, obedecen una misma relación. Sin embargo, no se sabe si

esto sucede por mera coincidencia o más bien como una consecuencia inevitable de la teoría dimensional propuesta.

El primer paso del análisis cuantitativo de desgaste radica en el cálculo de la constante adimensional de los modelos de desgaste propuestos, el coeficiente de desgaste. Una vez que se obtiene el coeficiente de desgaste, se puede utilizar para diferentes tareas:

1.- Para estimar la vida de algunos sistemas que presentan desgaste por deslizamiento.- Si se considera un nivel jerárquico de aplicaciones, este punto sería el más importante. Las principales limitaciones que se presentan en dicha tarea son la gran variedad e incertidumbre que existe de los mecanismos de desgaste.

2.- Para determinar el mecanismo de desgaste presente.- De acuerdo al mecanismo de desgaste será el rango de desgaste que se presente. En algunos casos esto es un buen indicio, puesto que al conocer el coeficiente de desgaste rápidamente se podrá distinguir entre un desgaste por adhesión y uno por abrasión. No obstante, en algunos casos más complejos se requerirá de otros análisis como lo son evaluación de la superficie y de las partículas generadas por el desgaste.

3.- Para determinar el tipo de movimiento.- Algunas veces esto es posible calculando el coeficiente de desgaste, lo cual determinará si el desgaste presente es por deslizamiento, por oscilación-vibración, por reacción triboquímica, etc.

4.- Para determinar los esfuerzos en sistemas en operación compuestos.- Es posible determinar la distribución de esfuerzos con tan solo conocer los diferentes coeficientes de desgaste que determinan directamente el esfuerzo.

En lo subsecuente se hará mayor énfasis en el desgaste por adhesión, debido a que es el que se presenta más frecuentemente en los procesos de desgaste por deslizamiento.

Se debe hacer notar dos características de los análisis cuantitativos de desgaste: primero, que son muy variados y segundo, que en la determinación de la razón de desgaste no son lo suficientemente precisos. Debido a esto, las técnicas propuestas se utilizan más en alternativas de diseño que en la predicción exacta de la vida de servicio de sistemas que presenten procesos de desgaste por deslizamiento.

2.3.1.- Coeficiente de desgaste para desgaste por adhesión.

La primer relación propuesta para la obtención del desgaste por adhesión fue postulada por Holm^[7]. Holm supuso que el desgaste se presentaba debido a la transferencia de átomos de una superficie de deslizamiento a otra y dedujo que el volumen de desgaste después de cierta cantidad de deslizamiento estaría dado por la ecuación:

$$W = k LS/H \quad \dots 2.25$$

donde L es la fuerza normal que presiona a las superficies de contacto, S es la distancia de deslizamiento y H la dureza de penetración de la superficie de desgaste. El término k es la constante de proporcionalidad adimensional.

Posteriormente Archard ¹⁸⁾, analizó el caso de superficies con deslizamiento relativo sobre las cuales se formarían partículas debido al desgaste comparables en tamaño con las uniones existentes entre las superficies de deslizamiento. Sin embargo, posteriormente encontró que el volumen de desgaste es independiente del tamaño de las partículas generadas por desgaste y que el desgaste está dado por:

$$W = k LS/3H \quad \dots 2.26$$

La ecuación es exactamente la misma que la de Holm, excepto por el factor 3 en el denominador. Este factor puede ser denominado un factor de forma debido al supuesto hecho por Archard, de que las partículas tenían forma esférica. Si se consideran otros aspectos como la forma de las partículas, se pueden obtener otros factores aplicables. Con el fin de simplificar los análisis de desgaste que se realizan, se considera a la ecuación (2.25) como la ecuación correcta. En la determinación de los coeficientes de desgaste puede existir una discrepancia, por ejemplo, en el caso de que se utilice para la obtención de k la ecuación (2.25) en vez de la ecuación (2.26), para poder realizar la comparación de manera correcta, simplemente se tendrá que dividir entre 3 el valor de k obtenido por (2.25).

De la ecuación (2.25) se deben de hacer diferentes observaciones:

Primero, a pesar de Holm y Archard consideran la transferencia de material de una superficie a otra, en casi todas las aplicaciones prácticas se está interesado en la formación de las partículas generadas debido al desgaste. No obstante, se ha observado que esta ecuación determina ambos procesos pero con diferentes constantes de desgaste.

Segundo, la ecuación (2.25) esta diseñada para determinar el volumen de desgaste de la superficie más suave de las dos que se consideran. Sin embargo, de ser necesario se debe de contar con una ecuación que determine el desgaste de la superficie dura.

Tercero, la ecuación (2.25) no revela ningún límite obvio de valores de coeficiente de desgaste. Dentro de la formulación de la ecuación (2.25), Holm consideró que en muchas circunstancias el desgaste por adhesión se detenía al haberse transferido una monocapa de una superficie a otra, lo cual lleva a un máximo valor de coeficiente de desgaste de 10^{-5} , sin embargo, se sabe que este valor es mucho más bajo que el límite real superior. Por otra parte, Archard definió k' como una probabilidad de que se forme una partícula de desgaste, lo cual propone un valor $k' = 1.0$, es decir $k = 0.33$, lógicamente este valor nunca se excede. Un análisis de tipo diferente en el cual se supone que la formación de partículas de desgaste se asocia con una deformación plástica severa, considera que si el factor k' fuera mayor a 1.0, se requeriría mayor trabajo para generar las partículas debido a desgaste, que el generado vía procesos de fricción. Debido a esto, el valor máximo propuesto por Archard ($k' = 1.0$) es convincente aunque la ecuación (2.25) no fuera correcta.

No existen límites inferiores obvios para el coeficiente de desgaste, más aún, no es claro porque el coeficiente de desgaste tiene que ser un valor diferente de cero. Sin embargo, como un hecho práctico se debe de agregar que todos los sistemas que presentan procesos de desgaste por deslizamiento, generan información medible de la cantidad de desgaste que se presenta en dichos procesos, por lo que el valor del coeficiente de desgaste esperado tiene un valor finito.

2.3.2.- Naturaleza de la ecuación de desgaste.

Desde un punto de vista morfológico, la ecuación (2.25) se parece a la ecuación de Young (2.27), que determina la elongación de un cable debido a una carga axial:

$$\delta = \frac{Ld}{AE} \quad \dots 2.27$$

donde:

δ = es la elongación del cable

L = carga aplicada

d = longitud del cable

A = área transversal del cable

E = Módulo de Young

(2.27) se puede comparar con la ecuación de desgaste (2.28), dada en términos de la profundidad de desgaste δ :

$$\delta = \frac{kLd}{A_{app}H} \quad \dots 2.28$$

L = carga aplicada

d = distancia de deslizamiento

A_{app} = área de contacto aparente

H = dureza de esfuerzo del material más suave

En ambos casos el pequeño desplazamiento generado como resultado ya sea del desgaste o por flexión elástica, es proporcional a la carga y a la distancia, e inversamente proporcional al área del material y a una constante del material que tiene dimensiones de esfuerzo. El parámetro k está presente en la ecuación de desgaste pero no en la de elasticidad, lo que permite suponer el hecho de que el desgaste no es resultado del contacto de cada una de las asperezas durante el deslizamiento.

Es interesante notar que a pesar de que la ecuación (2.27) es muy común dentro de la mecánica aplicada y que con frecuencia es utilizada por ingenieros de diseño para predecir la flexión del diseño propuesto, la ecuación (2.28) difícilmente es utilizada por los ingenieros de diseño para

estimar el desgaste de alguna superficie. Las diferencias surgen por dos razones: primero, la ecuación de desgaste tiene menos tiempo de haber sido planteada y por lo tanto de ser utilizada, mientras que la ecuación de elasticidad tiene casi 200 años de haberse planteado, por lo que su difusión y su uso ha sido muy amplia. Segundo, el factor k es muy difícil de obtener con un grado de precisión alto.

¿Como es posible que se presente tanto error o imprecisión? La respuesta no está bien establecida, sin embargo, una de las posibles respuestas es que dentro de las pruebas que se han realizado y que supuestamente manejan las mismas condiciones de prueba, el promedio de los valores que se obtienen de k presentan una variación del orden de 2. De hecho la variación puede ser entre otras cosas, debido a la dificultad en igualar las mismas características superficiales de los elementos de prueba.

La mayoría de los ingenieros no se muestran satisfechos al trabajar con valores con un error de $\pm 0.3\%$. No obstante, esta actitud no es realista puesto que el valor de los cálculos no se debe valorar con la precisión que se maneje, sino en que tanto es mejor que no se realice ningún cálculo. En el caso de desgaste la respuesta es clara. Considerando un rango amplio de sistemas que presenten procesos de desgaste por deslizamiento, los coeficientes de desgaste obtenidos varían en un rango de 10^{-1} a 10^{-8} , es decir, el rango donde puede caer el valor de los coeficientes de desgaste es de 10,000,000. Sí mediante un análisis realizado se puede reducir la incertidumbre de la cantidad de desgaste medida de un factor de diez millones a un factor de cuatro o incluso diez, claramente se ve que el valor obtenido será mucho más preciso.

2.3.3.- Obtención del valor de la dureza de la superficie

Supóngase que se realizó una prueba de desgaste y que se quiere obtener el coeficiente de desgaste a partir de ese experimento. La mayoría de los valores que se manejan en la ecuación (2.25), volumen, carga, distancia de deslizamiento, son conocidos. El término que queda por determinar es la dureza de penetración H , de la superficie de análisis. Frecuentemente esta dureza se obtiene mediante pruebas de dureza de penetración, ya sea Brinell, Vickers, o Knoop (el número de dureza utilizado en esta ecuación es la dureza de esfuerzo, sus unidades son kg/mm^2). En la practica estos números presentan pequeñas diferencias variando por aproximadamente un 10%. Las diferencias presentes pueden ser debido a efectos secundarios como trabajo de endurecimiento y/o recuperación elástica de los indentadores, los cuales varían de acuerdo a cada una de las pruebas. Sin embargo, cuando sea posible obtener esta información de la superficie de análisis, se debe de utilizar sin dar mucha importancia en las variaciones que se presenten, puesto que un 10% de error no representa mucho problema en cálculos de desgaste y no afectará la validez de los cálculos.

En muchos otros casos, se requiere obtener los coeficientes de desgaste aunque no se cuenten con los datos de la dureza de penetración del material. Algunas veces se utiliza la dureza Rockwell y posteriormente se transforma en alguno de los valores de dureza de penetración, en otros, se utilizan algunas otras aproximaciones para obtener la dureza. Sin embargo, puesto que no se necesita ningún grado de precisión de los valores de dureza cualquier valor de dureza obtenido se

puede utilizar en los cálculos del coeficiente de desgaste. Existen gráficos para la conversión de la dureza Rockwell a dureza de penetración ^[17].

2.3.4.- Métodos de cálculo del coeficiente de desgaste.

Para la mayoría de los sistemas de deslizamiento, no existe ningún problema en la obtención de los coeficientes de desgaste. Sin embargo, se debe tener cuidado en el manejo de las dimensiones, puesto que en muchas ocasiones se utilizan diferentes sistemas dimensionales, como lo son: $\text{kg}_f\text{-mm -s}$; $\text{lb}_f\text{-pulg-s}$; N-m-s ; din-cm-s .

2.3.5.- Obtención del coeficiente de desgaste.

Hasta el momento se ha hablado de situaciones donde se realiza una prueba, se obtiene la cantidad de desgaste presente y la incógnita es el coeficiente de desgaste. En situaciones de diseño donde el diseño a entregar debe cumplir con determinadas especificaciones, el problema es un poco diferente. Las cargas y velocidades se conocen, la cantidad de desgaste que se puede presentar sin que se genere una disminución considerable de la funcionalidad se puede calcular y el periodo de tiempo que va a trabajar se propone, ahora el problema es la selección de materiales y lubricantes que presentaran la funcionalidad deseada. El problema consiste en calcular k a partir de la ecuación (2.25), de manera más precisa el valor de k máximo aceptable, $k_{\text{máx}}$.

Actualmente el proceso de diseño es más complejo, puesto que la cantidad de materiales con la que se cuenta es muy amplia, y lo que generalmente se utiliza es el cociente de $k_{\text{máx}}/H$. Si se están considerando materiales de un rango de durezas amplio, se encontrará que son aplicables varios valores de $k_{\text{máx}}$.

En cualquier caso se supone que el diseñador ha realizado un cálculo de desgaste, además de un análisis del coeficiente de desgaste permisible para varios valores de dureza de los materiales. Su próxima tarea será determinar cuales son los materiales y el lubricante más adecuado que presente el valor mínimo de $k_{\text{máx}}$.

2.3.6.- Tablas de consulta de coeficientes de desgaste.

Sí las circunstancias no permiten la obtención del coeficiente de desgaste, se debe de recurrir a las tablas de desgaste. Sin embargo, la obtención de un coeficiente de desgaste a partir de tablas no es tan sencilla, puesto que no existe la suficiente cantidad de información para todos los materiales, además de que los coeficientes de desgaste presentados en tablas son resultados particulares de pruebas que alguien realizó. Debido a esto, en la mayoría de las veces es recomendable la obtención del coeficiente de desgaste para una aplicación deseada. Ahora bien, en el caso de que se obtenga el coeficiente de desgaste vía experimental, será necesario compararlo con el obtenido mediante tablas. Una variación (i.e, por ejemplo mayor a un factor de cuatro), quizá pueda representar un error matemático, o que el sistema en deslizamiento

analizado está presentando un cambio de régimen de desgaste. Sí el error es de más de un factor de diez, antes de tomar el valor obtenido como definitivo, sería preferible realizar nuevamente la prueba con las precauciones necesarias.

2.4.- DESGASTE POR DESLIZAMIENTO.

El desgaste por deslizamiento, se origina al existir movimiento relativo entre dos superficies de contacto suaves y sometidas a carga. Se caracteriza por que el daño de la superficie no es debido a daños ocasionados por la penetración de partículas generando cortes, canales, surcos o ranuras.

En la figura 2.14, se observa que la fricción y el desgaste se ven influenciados por diferentes factores durante un proceso de deslizamiento entre superficies. Las propiedades microgeométricas, se refieren a la rugosidad y textura de la superficie las cuales dependen del método de fabricación. Las cargas y propiedades macrogeométricas se refieren a las cargas, vibraciones, velocidades de deslizamiento, a la forma y dimensión de la superficie de los cuerpos. Las propiedades triboquímicas de la superficie se refieren a las capas formadas por los átomos absorbidos, al tipo de superficie, a las propiedades de reacción química de la superficie, a la conductividad térmica y a la conductividad eléctrica. Dentro del medio ambiente se considera a la humedad, temperatura, composición, lubricantes y a la presión parcial de la atmósfera gaseosa. Finalmente, el desgaste en los procesos de deslizamiento se ve influenciado por las propiedades metalográficas, que parte importante en el presente estudio.

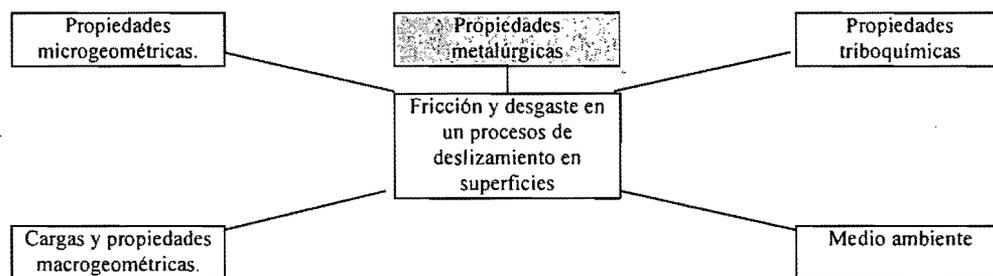


Figura 2.14.- Propiedades superficiales que afectan a la fricción y el desgaste en un proceso de deslizamiento entre superficies ^{III}.

Como ya se mencionó, básicamente en el desgaste por deslizamiento se pueden presentar cuatro mecanismos de desgaste:

1. adhesión,
2. abrasión,
3. fatiga de la superficie y/o
4. reacción triboquímica.

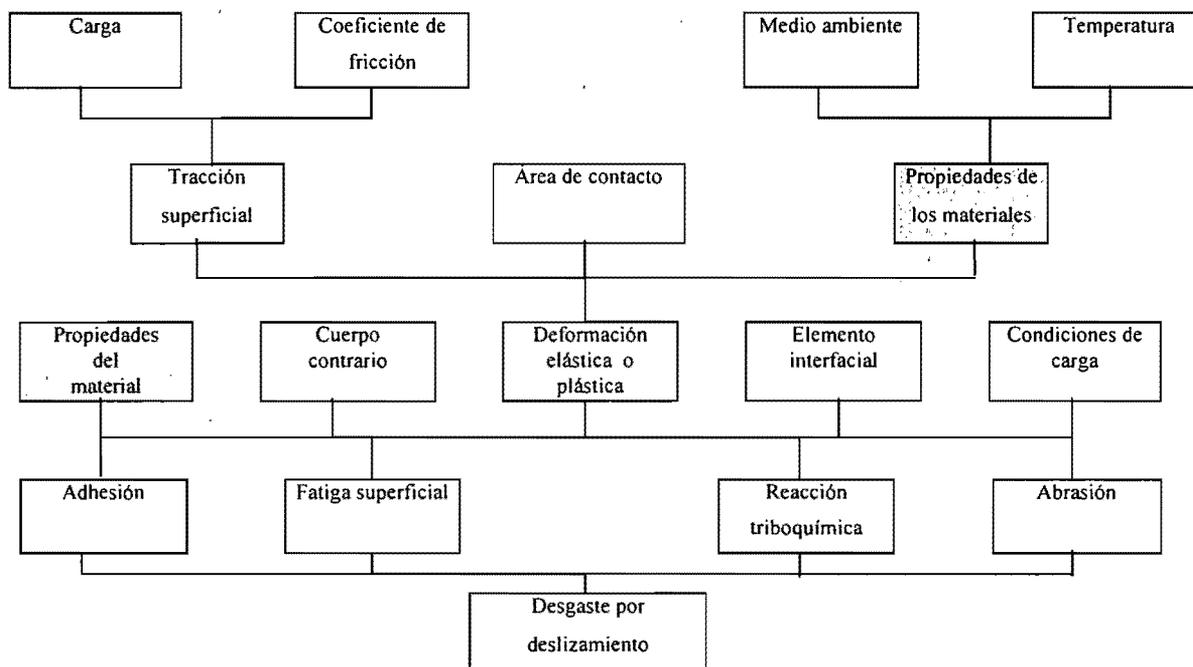


Figura 2.15.- Factores que determinan el mecanismo de desgaste predominante en el desgaste por deslizamiento ^[1].

Para determinar el tipo de mecanismo de desgaste que predomina durante el contacto por deslizamiento, se deben considerar diferentes factores como se muestra en la figura 2.15. El efecto generado por el deslizamiento de las superficies está en función de la tracción tangencial, del área de contacto y de las propiedades de los materiales, las cuales pueden resultar en deformación plástica o elástica. Esto junto con los elementos que intervienen en el sistema sometido al proceso de deslizamiento, determinan el mecanismo de desgaste predominante.

En la figura 2.14, se observa que las propiedades metalúrgicas de los materiales intervienen en el desgaste por deslizamiento, dentro de estas se encuentran las siguientes, figura 2.16:



Figura 2.16.- Propiedades metalúrgicas que intervienen en el desgaste por deslizamiento ⁽¹⁾.

Estas son las propiedades metalúrgicas de los materiales que hay que considerar en los procesos de desgaste por deslizamiento.

2.4.1.- Desgaste por deslizamiento en los metales.

En gran parte los efectos del contacto por deslizamiento, se pueden suprimir por lubricación o por capas de óxido formadas en las superficies de los metales. Sin embargo, en el desgaste por deslizamiento de los metales intervienen diversos factores, los cuales hacen variar los comportamientos que se presentan. La microestructura y las propiedades físicas de los metales pueden ser factores determinantes en la presencia de los mecanismos de desgaste. Algunas de las propiedades físicas y microestructurales que intervienen en el desgaste por deslizamiento de los metales son:

Dureza.- Dependiendo del mecanismo de desgaste puede mejorar, empeorar o no afectar la resistencia al desgaste, sin embargo, en la mayoría de veces un incremento en la dureza del material mejora la resistencia al desgaste.

Resistencia a la fatiga.- Generalmente al incrementar la resistencia a la fatiga se genera una mejoría en la resistencia al desgaste.

Ductilidad.- Si el proceso de deformación no es quien predomina en los efectos del desgaste, un aumento en la ductilidad del material puede resultar en una mejora en la resistencia al desgaste.

Inestabilidad mecánica.- Cuando existe inestabilidad en la microestructura del material se pueden introducir cambios de manera mecánica, los cuales pueden mejorar la resistencia al desgaste, tal es el caso del trabajo de endurecimiento. Al realizarlo se pierde ductilidad y se presenta un endurecimiento en la superficie, lo que puede generar una mejora en la resistencia al desgaste. Sin embargo, para que esto suceda hay que considerar el mecanismo de desgaste predominante, ya que en algunos casos la resistencia al del desgaste se puede afectar en vez de mejorar.

Distribución de la deformación.- En algunos casos la presencia de deformaciones y la consecuente concentración de esfuerzos mejora la resistencia al desgaste.

Así como estas existen muchas otras propiedades de los materiales que intervienen en los tribosistemas de los procesos de desgaste por deslizamiento. Hay que mencionar que estas propiedades generalmente se presentan juntas y distinguir la influencia de cada una de ellas resulta muy complejo, por lo que la mayoría de veces es conveniente analizarlas por separado.

Referencias.

- [1] K - H. Zum Gahr
Microestructure and wear of materials.
Elsevier, 1987.
- [2] F.P. Bowden
Friction and Lubrication.
Matheus Physical Monographs, 1967.
- [3] F.J. Quinn
Physical analysis for trybology.
Cambridge University, 1991.
- [4] Dowson. D
History of tribology.
Longman, London 1978.
- [5] H. Ichimura
Trend of market and technology for plasma procesesing of materials in Japan.
CNEA, B.A., Argentina, 1998
- [6] Metals Handbook
Properties and selection.
Vol. 1, 1972.
- [7] Holm. R.
Electric contacs
Almqvist and Wiksells,1946.
- [8] Archard. J.F.
"Contact and Rubbing of Flat Surface"
Revista "Journal of Applied Physics", Vol. 24, 1953.
- [9] Dorison.A, Broman. V.E.
Contact Stress and Load as Parameters in Metallic Wear
Vol 4, 1961.
- [10] Richard.R.C.D.
"The Maximun Hardness of Strained Surface and The Abrasive Wear of Metals and Alloys"
Revista "WEAR", Vol. 10 1967.

- [11] Hirts.W, Lancaster.J.K.
“Surface Film Formation and Metallic Wear”
Revista “Journal of Applied Physics”, Vol. 27,1956.
- [12] Rabinowics. E.
Wear coefficients-Metals, Wear control Handbook
ASME 1980.
- [13] Suh.N.P.
“Delamination Theory of Wear”
Revista “WEAR”, Vol. 25 1973.
- [14] Quinn.T.F.J.
“Review of Oxidation Wear”
Revista “International Tribology”, Vol. 16 1983.
- [15] Halling.J.
“Toward a Mechanical Wear Ecuation”
Revista “ASME Journal of Tribology”, Vol 1051983
- [16] J.Y.Lin., H.S.Cheng
“An Analytical Model for Dinamic Wear”
Revista “Transaction of the ASME”, Vol 111 1989.
- [17] E. Rabinowicz
Wear coefficiente-metals
Cambridge Massachusetts, 1980

CAPÍTULO III.

3.- INFLUENCIA DE LA MICROESTRUCTURA DE LOS METALES EN LOS PROCESOS DE DESGASTE.

3.1.- Microestructura y propiedades mecánicas de los materiales.

Actualmente existen más de 80,000 materiales, los cuales se pueden dividir en cuatro grupos principales:

1. metales,
2. cerámicos,
3. polímeros,
4. compuestos.

Cada uno de ellos tiene características propias que los identifica, como los son sus propiedades físicas, químicas y mecánicas ^[1]. Los materiales involucrados en este trabajo son los metales, por lo que sólo se hará referencia en su entorno.

Los metales se caracterizan por tener un enlace metálico, el cual se considera indirecto. En el intervienen los electrones de valencia formando una nube de electrones, los cuales pueden moverse libremente entre los átomos. Cuando un metal se dobla y los átomos intentan cambiar su relación entre ellos, la dirección del enlace simplemente cambia de dirección en lugar de romperse ^[2].

3.2.- Estructura de los metales.

Los metales pueden ser distinguidos en cristalinos y amorfos, dependiendo de sus arreglos atómicos como se muestra en la figura 3.1. Los cristales de los metales son formados por átomos o moléculas, los cuales presentan un arreglo tridimensional ^[3]. Los sistemas cristalinos más importantes en los metales son:

- estructura cúbica centrada en las caras (f.c.c.)
- estructura cúbica centrada en el cuerpo (b.c.c.)
- estructura hexagonal compacta (c.p.h.)

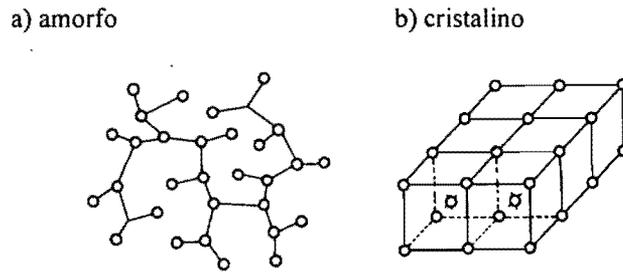


Figura 3.1.- Arreglos atómicos que se presentan en los metales ^[4]:

- (a) metales amorfos,
(b) metales cristalinos.

La mayoría de los materiales con estructura cristalina, son policristalinos. Esto es, son una colección de cristales o granos, los cuales se han formado de manera independiente y en sus arreglos presentan diferentes orientaciones. Los materiales no cristalinos o estructuras amorfas presentan un orden de rango corto, ordenados en un rango amplio. En un sólido amorfo, los átomos de la frontera más cercana están ordenados, sin embargo, no hay periodicidad como en el caso de los cristales. Las estructuras amorfas son metaestables, es decir no están en estado de equilibrio. Los metales amorfos se pueden producir por diferentes métodos de enfriamiento rápido desde su estado líquido. Su estructura se describe por aglomeración de microcristales, por grupos de unidades moleculares o por empaquetamientos aleatorios densos de esferas duras, y es llamada la estructura de Bernal.

El término microestructura de policristales involucra: estructura nuclear, arreglos moleculares y atómicos, defectos cristalinos, anisotropía estructural y cristalina, y transformaciones de fase ^[4].

Un cristal real se puede identificar de uno ideal por sus defectos. Los defectos cristalinos se pueden clasificar por sus dimensiones en:

0. defecto puntual: vacantes, átomos solutos sustitucionales o intersticiales;
1. defecto lineal: dislocaciones;
2. defecto de área: fronteras de grano o de cristales, bordes de macla, fallas de apilamiento, fronteras antifase;
3. defectos de volumen: partículas coherentes, semicoherentes o incoherentes.

Los defectos tridimensionales se obtienen por la unión de defectos cero. Los defectos cristalinos se obtienen en la cristalización a partir de estado líquido por: recocido, temple, irradiación, y/o deformación plástica. La figura 3.2, muestra una estructura cristalina de un material inorgánico. Se debe saber que la microestructura puede variar mucho y depende de las propiedades de los materiales.

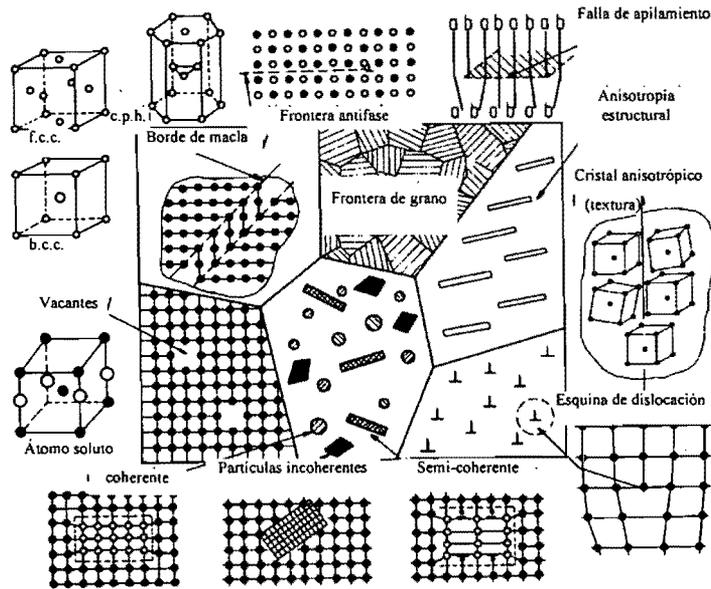


Figura 3.2.- Representación esquemática de los elementos estructurales de sólidos inorgánicos [4].

Las propiedades de los materiales se ven influenciadas por:

- a) la estructura cristalina, tamaño, forma y orientación de los granos, o
- b) por su composición química.

Al considerar la estructura cristalina, intervienen la densidad de los defectos cristalinos como lo son: vacantes, dislocaciones; tipo, tamaño, volumen, forma y orientación de las segundas fases, un ejemplo de ello son los precipitados. Debido a los diversos factores de la microestructura que intervienen en las propiedades de los materiales, la predicción de las propiedades de los materiales multifase puede ser muy complicada [5].

La microestructura en los metales se determina principalmente por su composición química y por su proceso de producción, teniendo la característica de poder ser alterada por tratamientos térmicos, mecánicos o termomecánicos.

Los tratamientos térmicos como el recocido, el temple, el revenido de los aceros y envejecimiento en las aleaciones de aluminio por mencionar algunos, son aplicados para modificar la microestructura y mejorar las propiedades de los metales. La combinación de los tratamientos mecánicos y térmicos, como el rolado y el recocido, son ampliamente usados para obtener alta resistencia en aceros de baja aleación. La microestructura obtenida puede ser alterada durante el servicio, principalmente por cargas químicas, térmicas o mecánicas. Por ejemplo, durante el servicio, las altas temperaturas pueden generar crecimiento del tamaño de los precipitados, o durante el trabajo mecánico se pueden generar orientaciones preferenciales de los cristales.

De manera general, el comportamiento de las microestructuras en diferentes circunstancias, como en el caso de *desgaste*, depende de su composición química, su historial de producción (procesos de manufactura, tratamientos térmicos, etc.) y las condiciones de operación.

3.3.- Estructura de las superficies de los metales.

La fricción y el desgaste, se presentan debido al contacto entre superficies con movimiento relativo. La interacción que se da entre dos cuerpos, por ejemplo: contacto por deslizamiento, se restringe primordialmente a las superficies cuando los efectos secundarios como las vibraciones no se consideran. De ahí que la importancia de la estructura y propiedades de la superficie pueden ser muy importantes en el proceso de desgaste.

El término “superficie”, se puede entender como la transición del material con el medio que lo rodea, involucrando así situaciones donde la estructura de la superficie se ve alterada al cambiar el medio en consideración. Las superficies se pueden describir por:

- a) su topografía y estructura,
- b) sus propiedades físicas, químicas y mecánicas.

La figura 3.3, muestra modelos de la topografía y estructura de superficies de metales donde las diferentes escalas que se muestran deben ser consideradas. La topografía microscópica sobre la escala de 0.1 a 100 μm depende del método con el que se produce la superficie sólida. Frecuentemente la topografía de la superficie se describe en dos planos dimensionales. El pico superior del valle más alto o el centro promedio de los valles, son parámetros que generalmente se utilizan para caracterizar la *rugosidad de la superficie*. En la figura 3.3b. se presenta un corte de la sección transversal. Desde el interior hasta el exterior, el metal se ve afectado de diferentes maneras por los diferentes procesos a los que se ve sometido. Por ejemplo, en una superficie maquinada, se pueden presentar poros, grietas, óxidos u otros defectos. El espesor de esta capa varía desde 0.3 μm para superficies pulidas, hasta 50 μm para superficies acabadas en torno. El efecto debido a la reacción química que se presenta sobre esta capa abarca de 1 a 10 nm. Para los metales que están en contacto con aire, generalmente esta capa es formada por óxido, la capa de óxidos es adherida y queda como una capa absorbida. Los átomos o moléculas del medio, por ejemplo H_2O , se pueden absorber hasta una profundidad de 0.4 nm. Los átomos absorbidos por mecanismos físicos o químicos cambian las propiedades químicas, físicas y electromecánicas de la superficie. La superficie externa se puede ver afectada por los contaminantes, abarcando un espesor de tan sólo pocos nanómetros ^[4].

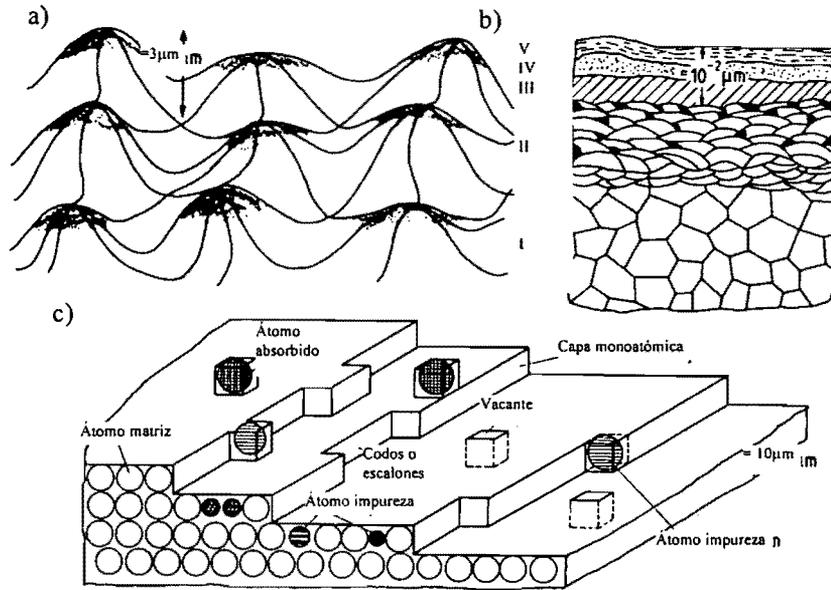


Figura 3.3.- Topografía y estructura de superficies de metales ^[4]:

- (a) topografía de la superficie en escala microscópica.
- (b) sección transversal de la transición de un metal con su medio o entorno:
 - I) microestructura, II) capa trabajada o defectuosa, III) capa de reacción, IV) capa absorbida, V) capa contaminada.
- (c) topografía de la superficie a escala atómica.

Con la ayuda de diferentes herramientas para el análisis de la superficie, se pueden distinguir diferentes tipos de capas^[7]. Dentro de la escala atómica en la figura 3.3c., las superficies de los sólidos están formadas por terrazas, átomos absorbidos, átomos de impurezas, vacantes y escalones o muescas. Dentro de la metalurgia física, se han desarrollado diferentes modelos para describir la estructura de las fronteras de grano. Una frontera de grano representa una superficie interna de un material policristalino. Consecuentemente, se pueden usar modelos teóricos para las fronteras de grano, para describir los arreglos atómicos sobre las superficies de los sólidos o sobre las áreas de contacto de dos cuerpos. En las superficies, las fronteras de grano consisten generalmente de arreglos periódicos de átomos, de hecho se tiene evidencia experimental al respecto.

3.4.- Propiedades de volumen de los metales.

Según sea la estructura de la superficie, las propiedades de volumen y las propiedades de la superficie de los metales pueden ser diferentes, por lo que el efecto de la microestructura sobre las propiedades mecánicas de volumen debe de considerarse. La interacción entre dos cuerpos puede ser elástica o plástica, dependiendo entre otras cosas de la resistencia y

dureza del material. Por lo anterior mencionado, la resistencia y la dureza son dos factores importantes dentro de los tribosistemas.

La resistencia se puede definir como la fuerza que se opone a la deformación plástica y a la propagación de grietas. La deformación plástica en materiales cristalinos ocurre por deslizamiento, por torque, por escalonamiento o por transformaciones de fase, como se muestra esquemáticamente en la figura 3.4. A altas temperaturas, los policristales también se pueden deformar por ascenso de dislocaciones o por deslizamiento de fronteras de grano.

El deslizamiento, es el desplazamiento de parte del cristal, debido al movimiento de desliz de las dislocaciones sobre ciertos planos. Por otra parte, los codos o escalonamientos se producen por la rotación progresiva del cristal, presentándose bandas de escalonamiento que separan a los cristales no escalonados mediante paredes de dislocaciones. Las bandas de escalonamiento son normales al plano de deslizamiento. Las torceduras se generan con ayuda del movimiento de los átomos, los cuales presentan un movimiento relativo entre ellos en un espacio interatómico menor dentro de la estructura.

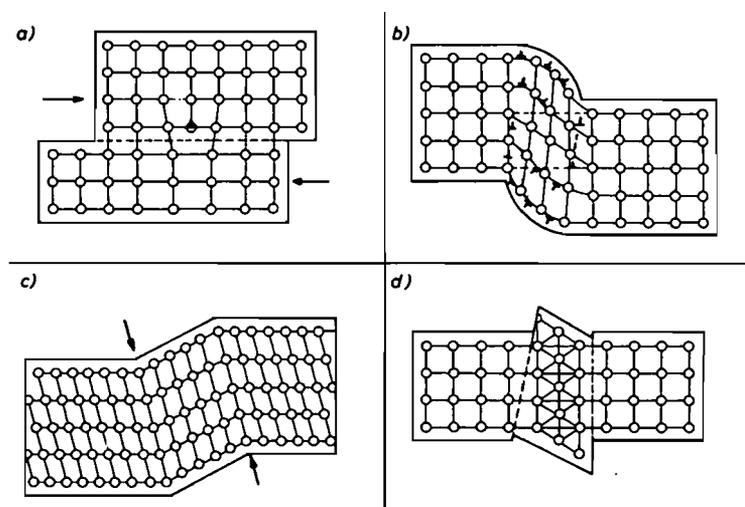


Figura 3.4.- Representación esquemática de un proceso de deformación plástica en materiales inorgánicos ^[4]:

- (a) deslizamientos,
- (b) codos o escalonamientos,
- (c) torceduras,
- (d) transformaciones de fase.

Las transformaciones de fase se originan por una transformación cristalográfica de una estructura cristalina a otra, lo cual puede originar un cambio de volumen. Un ejemplo claro, es el cambio de austenita (f.c.c.) a martensita (b.c.t.), lo cual da como resultado un incremento aproximado de volumen de 1.5%.

Los movimientos de desliz de las dislocaciones son un factor importante a considerar en la deformación plástica de las estructuras cristalinas. El deslizamiento debido a las dislocaciones puede ser microscópicamente homogéneo o heterogéneo. La figura 3.5, muestra las bandas de deslizamiento homogéneas y heterogéneas en superficies deformadas plásticamente.

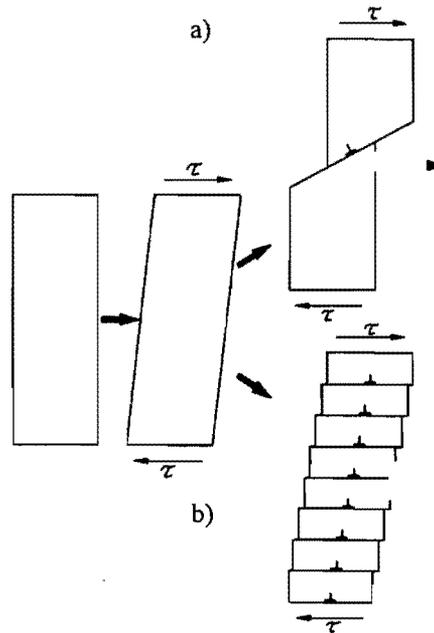


Figura 3.5.- Descripción esquemática de deslizamientos ^[4]:

- (a) homogéneos.
- (b) no homogéneos.

Los factores que favorecen los distintos tipos de deslizamiento se presentan en la tabla 3.1.

Deslizamiento Homogéneo	Deslizamiento Heterogéneo
1. Alta energía de falla de apilamiento.	1. Baja energía de falla de apilamiento.
2. Partículas Bypasses.	2. Partículas de precipitados cortados.
3. Dislocación forestal.	3. Orden de rango corto.
4. Ascenso de dislocaciones.	4. Daño por radiación y orificios.
5. Varios sistemas de deslizamiento en operación.	5. Pocos sistemas de deslizamiento en operación.
6. Grano de tamaño pequeño.	6. Dislocaciones de emisión.
	7. Grano de tamaño grande.

Tabla 3.1 Factores que intervienen en el deslizamiento.

Un cristal que es sometido a un esfuerzo cortante, puede presentar tanto deslizamiento homogéneo como heterogéneo, dependiendo del número y distribución del origen de las dislocaciones, así como de la habilidad de las dislocaciones para desviarse de los planos de deslizamiento. En casos extremos un cristal es cortado heterogéneamente sobre un sólo plano de deslizamiento. Deslizamientos finos y en grupos se presentan sólo si pocos o muchos planos se activan respectivamente.

La resistencia a la deformación plástica, se puede incrementar al impedir el movimiento de las dislocaciones, sobre los planos de deslizamiento. Para incrementar el límite de cedencia σ_y de un material en una cantidad $\nabla\sigma$, se necesitan poner diferentes obstáculos en el camino de las dislocaciones, por ejemplo: átomos, partículas, fronteras de grano o dislocaciones. Para ello se presentan los siguientes mecanismos de endurecimiento, basados en los elementos microestructurales:

Endurecimiento por solución sólida $\nabla\sigma_{ss}$.

Endurecimiento por precipitación $\nabla\sigma_p$.

Endurecimiento por dislocaciones $\nabla\sigma_d$.

Endurecimiento por fronteras de grano $\nabla\sigma_{gb}$.

Endurecimiento por textura $\nabla\sigma_{tex}$.

Endurecimiento por anisotropía $\nabla\sigma_{an}$.

Endurecimiento por transformación $\nabla\sigma_{tr}$.

El endurecimiento por solución sólida $\nabla\sigma_{ss}$, se caracteriza por la introducción de defectos puntuales dentro de la estructura de manera deliberada y controlada. El endurecimiento por precipitación $\nabla\sigma_p$, se caracteriza por la precipitación de un constituyente desde una solución sólida sobresaturada y se puede realizar por envejecimiento. El endurecimiento por dislocaciones $\nabla\sigma_d$ se puede obtener por trabajo en frío. El endurecimiento por textura $\nabla\sigma_{tex}$ se presenta en cristales simples o en materiales policristalinos, un ejemplo de endurecimiento por textura lo son las orientaciones preferenciales de los granos, las cuales se pueden generar por un proceso de deformación. El endurecimiento o fortalecimiento por texturas puede ser obtenido de manera particular en metales hexagonales altamente anisotrópicos. Una estructura anisótropa, puede ser utilizada para endurecimiento por el alineamiento de segundas fases resistentes en la dirección de la carga externa. Al presentarse en forma continua partículas frágiles arregladas de manera uniaxial en una matriz dúctil, obtenemos un endurecimiento por anisotropía $\nabla\sigma_{an}$. La transformación de austenita (γ) a martensita (α) en los aceros, representa una transformación de la estructura cristalina sin cambio en la composición química. El endurecimiento por transformación $\nabla\sigma_{tr}$ γ - α , se origina principalmente por el incremento de la densidad de las dislocaciones y la supersaturación de la estructura cristalina- α por átomos de carbono.

Generalmente cuando se hacen propuestas para minimizar los efectos del desgaste en los metales, se hace gran énfasis en mejorar la resistencia de las aleaciones metálicas dejando de lado la ductilidad. En muchos problemas de desgaste, la ductilidad que presentan las diferentes aleaciones metálicas parece ser suficiente. Sin embargo, hay que considerar que la ductilidad decrece drásticamente al incrementar la resistencia o la dureza, por lo que se debe establecer un compromiso entre una alta resistencia y una buena ductilidad al realizar las modificaciones pertinentes.

La tenacidad a la fractura puede ser un indicativo de gran ayuda para medir la ductilidad requerida en los procesos de desgaste, puesto que al incrementar el esfuerzo de cedencia se disminuye la tenacidad a la fractura. El concepto de tenacidad a la fractura se encuentra en la presencia de una grieta en un material sometido a esfuerzos. Así, otra limitante en los mecanismos de desgaste puede ser la formación de grietas, la cual se ve favorecida por:

- a) inclusiones o partículas incoherentes,
- b) granos frágiles, bordes de macla o de fase,
- c) bandas de deslizamiento.

Los deslizamientos heterogéneos pueden resultar en altas deformaciones y concentraciones de esfuerzo en las interacciones de las bandas de deslizamiento o en el apilamiento de las dislocaciones. Las grietas se pueden formar por el apilamiento de una serie de dislocaciones de las fronteras de grano u otros obstáculos resistentes. El esfuerzo cortante aplicado es multiplicado por el número de dislocaciones, por ejemplo: 50 o 100 apilamientos. Los esfuerzos aplicados se pueden incrementar substancialmente por los esfuerzos residuales, los cuales pueden ser generados durante la producción del material o componente. El comportamiento de las fronteras de grano durante la deformación plástica, puede ser clasificada desde dúctil hasta frágil. En la figura 3.6, se muestran fronteras de grano de diferentes ductilidades y estructuras.

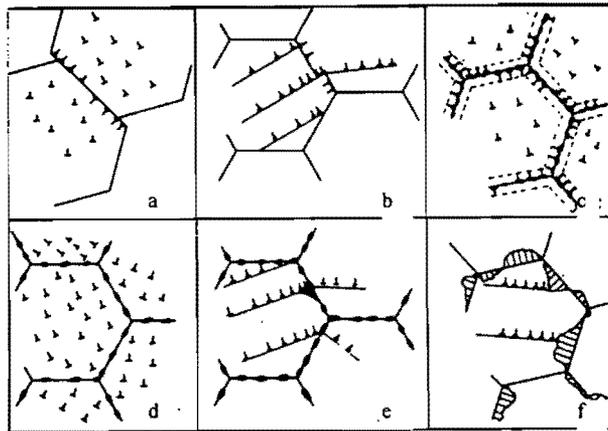


Figura 3.6.- Representación esquemática de las interacciones de las fronteras de grano y dislocaciones durante la deformación plástica (\perp dislocaciones) [4].

- a) deslizamiento de las fronteras de grano,
- b) cortante de fronteras de grano dúctiles y deslizamientos heterogéneos dentro del grano,
- c) acumulación de deformación dentro de la precipitación - zonas libres en las fronteras de grano,
- d) fronteras de grano fragilizadas por partículas y deslizamientos homogéneos dentro del grano,
- e) agrietamiento de las fronteras de grano frágiles debido a deslizamientos heterogéneos en el interior del grano,
- f) precipitaciones discontinuas en las fronteras de grano y deslizamientos heterogéneos dentro del grano.

La fragilización se puede presentar, por la misma fragilización de las fases sobre las fronteras de grano o por la migración de átomos solutos hacia ellas. Dependiendo del sistema de desgaste, se tienen que considerar diferentes propiedades mecánicas, como los son: la resistencia a la deformación plástica y la resistencia a la formación o propagación de grietas.

3.5.- Propiedades de la superficie de los metales.

En el modelo presentado en la figura 3.3, se observa que los átomos en las capas de las superficies, están arreglados de manera muy similar a los del cuerpo o a las fronteras de grano de los policristales. Frecuentemente la composición química de las superficies difiere substancialmente a la del cuerpo. Esto puede ser debido a la segregación de átomos solutos, por ejemplo: la difusión de átomos hacia o de la superficie, absorción de átomos del medio, o la absorción de átomos y la formación de compuestos. Ejemplos de esto, lo son la nitruración, oxidación, carburación o descaburación de los aceros. Los procesos de segregación o la absorción de las superficies generan un endurecimiento o ablandamiento de las mismas. Es bien sabido que los efectos del medio ambiente afectan las propiedades mecánicas tanto de los metales como de los no metales, por lo que no se pueden pasar por desapercibido.

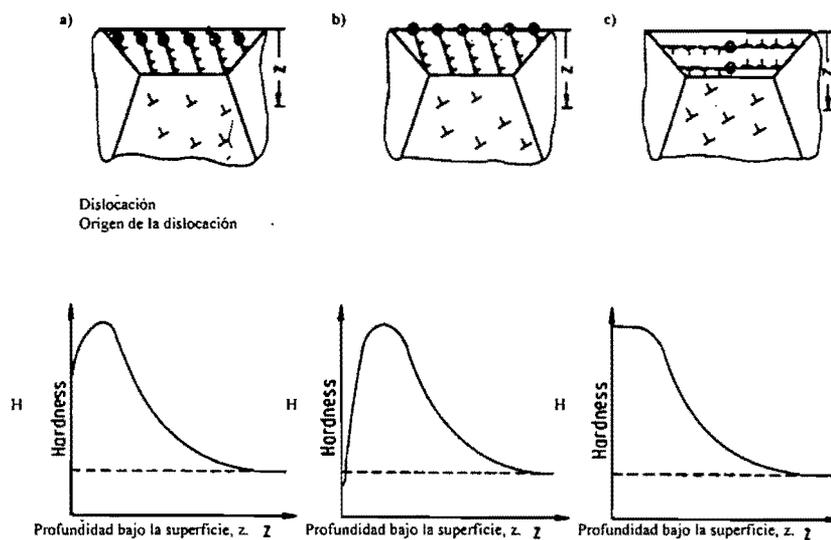


Figura 3.7.- Representación esquemática de la dureza durante la carga y generación de dislocaciones cerca de la superficie [4].

Existen diferentes puntos de vista acerca de las diferencias de dureza y resistencia entre la superficie y el cuerpo. En la figura 3.7, se presentan esquemáticamente diferentes modelos de dureza contra profundidad bajo la superficie [8]. La mayor dureza se presenta a cierta distancia de la superficie o en la superficie misma. Se ha establecido que la plasticidad de los metales se determina principalmente por la generación, movimiento e interacción de las dislocaciones. Para entender el comportamiento del endurecimiento o ablandamiento de la superficie durante la deformación plástica, es necesario conocer la historia de la formación de la superficie en estudio. Por ejemplo, el maquinado de la superficie resulta en el endurecimiento de las capas cerca de la superficie, algo similar a lo que ocurre en el desgaste por deslizamiento. El maquinado de la superficie también puede generar el ablandamiento de la misma, debido a la presencia de altas temperaturas de la zona lo que ocasiona una recuperación o recristalización. Las microestructuras de la superficie producidas por recubrimientos dependen del rango de enfriamiento. Cuando se presentan diferencias entre el tamaño de grano de la superficie y el del cuerpo, también se originan cambios en las propiedades mecánicas.

De esta forma se puede concluir que la microestructura de los metales es un factor determinante en las propiedades de los materiales. Muchas de esas propiedades son determinantes en su comportamiento en desgaste. Esto significa, que si se tiene un manejo adecuado de la microestructura mediante tratamientos térmicos, mecánicos o termomecánicos, se pueden obtener variaciones en sus propiedades que se pueden ver reflejadas en una mejora en su comportamiento en desgaste.

Referencias.

- [1] B.Chalmers
Physical metallurgy.
John Wiley& sons, 1968.
- [2] D.R. Askeland
La ciencia e ingeniería de los materiales.
Editorial Iberoamérica, 1987.
- [3] S.H. Avner
Introducción a la metalurgia física.
McGraw-Hill, 1988.
- [4] K - H. Zum Gahr
Microstructure and wear of materials.
Elsevier, 1987.
- [5] Metals Handbook
Properties and selection .
Vol. 1, 1972.
- [7] Archard. J.F.
Contact and Rubbing of Flat Surface
Revista "Journal of Applied Physics", Vol. 24, 1953.
- [8] Richard.R.C.D.
"The Maximun Hardness of Strained Surface and The Abrasive Wear of Metals and Alloys"
Revista "WEAR", Vol. 10 1967.

CAPÍTULO IV.

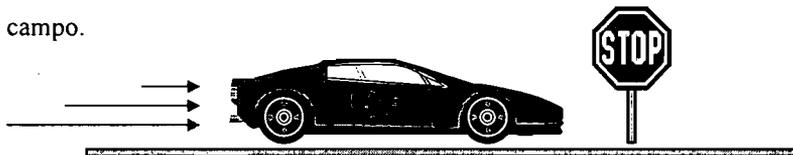
4.- PRUEBAS TRIBOLÓGICAS.

4.1.- Clasificación.

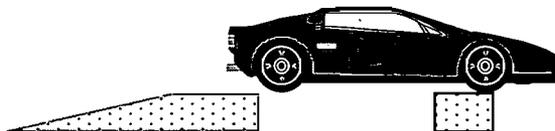
Las pruebas tribológicas involucran el estudio de la fricción, el desgaste y la lubricación. Existen un sin número de equipos para pruebas, sin embargo, poco se ha hecho para estandarizar o para correlacionar las pruebas relacionadas entre ellos ^[1]. Las pruebas tribológicas se dividen en 6 diferentes categorías, las cuales se muestran en la figura 4.1.

Como se puede ver el rango de aplicación de las pruebas es muy amplio, ya que se extrapola simplificando desde las pruebas de campo, hasta las pruebas modelo ^[2]. Desde luego las pruebas de campo con los componentes en operación son las mejores pruebas, sin embargo, también son las más complejas y las más costosas ^[3]. Esto es debido a que se requieren largos tiempos de pruebas y un alto control de las diferentes variables del proceso. Las pruebas modelo son una gran ventaja para el desarrollo científico, siempre y cuando sea correcta la reproducción de los parámetros de prueba, para garantizar los resultados obtenidos. En las pruebas modelo, las condiciones experimentales son fácilmente modificadas y el costo es relativamente bajo.

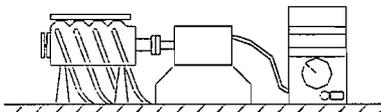
1. Pruebas de campo.



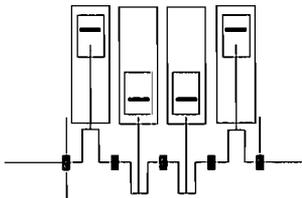
2. Pruebas de banco.



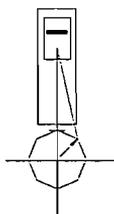
3. Prueba de Subsistemas.



4. Prueba de componentes.



5. Prueba simplificada de componentes.



6. Prueba modelo (i.e. Pin on disk)

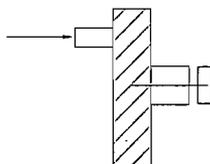


Figura 4.1.- Clasificación de los diferentes tipos de pruebas tribológicas ^[3].

Para poder aplicar de manera precisa las pruebas modelo, se deben conocer: los diferentes mecanismos de desgaste que involucran el sistema, las condiciones de carga y tener herramientas para determinar la similitud del tribosistema de la prueba modelo y su aplicación. Un ejemplo, lo son las partículas debido al desgaste (si es que se presentan), si las partículas obtenidas en la prueba modelo no son iguales a las que se presentan en la realidad, los resultados no se pueden extrapolar de manera simple, por lo que se busca la mayor aproximación en la prueba modelo. Las pruebas tribológicas son muy útiles por que abarcan diferentes variables que se pueden estudiar por separado o de manera conjunta como se muestra en la figura 4.2.

Debido a las características del presente estudio sólo se hará referencias a las pruebas modelo, enfocándose a la vida útil de los elementos analizados y optimización del tribosistema en consideración.

4.2.- Pruebas modelo para medición de desgaste.

Las pruebas modelo para medición de desgaste, bajo condiciones experimentales permiten optimar la selección de materiales para obtener una mejor funcionalidad en los diseños

propuestos, o bien proponer nuevos diseños mediante la selección de materiales más adecuados para una aplicación determinada ¹⁴⁾.

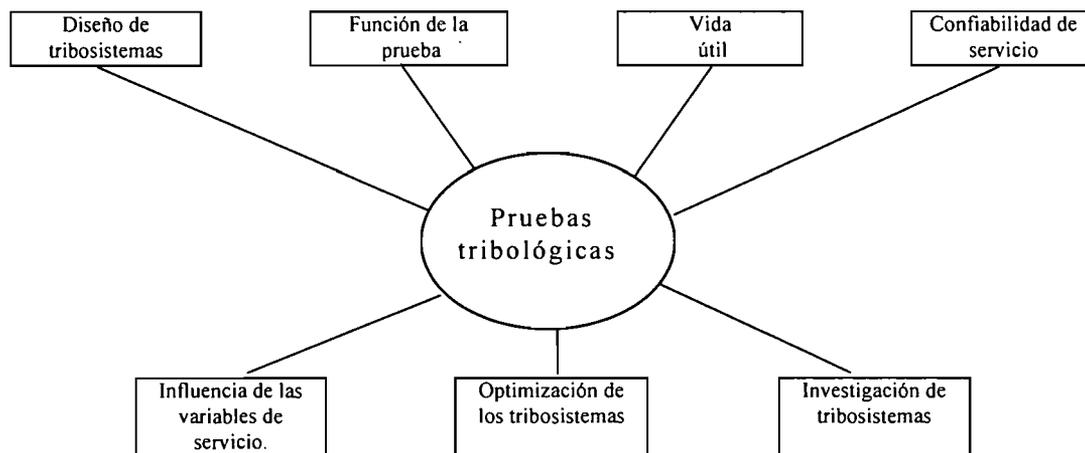


Figura 4.2.- Alcance de las pruebas tribológicas ¹³⁾.

A continuación se mencionan algunas de las pruebas tribológicas más comunes, Tabla 4.1¹⁵⁾:

Nombre de la prueba	Mecanismo de análisis de acuerdo a la cinemática del movimiento
Espiga-sobre-disco	deslizamiento
Espiga-sobre-placa	deslizamiento
Anillos de sujeción-empuje	deslizamiento
Placas rectangulares sobre un cilindro en rotación	deslizamiento - rotación
Cilindros cruzados	deslizamiento - rotación
Cuatro esferas	rotación
Prueba de abrasión Taber	abrasión
Prueba abrasiva por banda	abrasión
Prueba abrasiva en seco	abrasión

Prueba abrasiva con arena húmeda	abrasión
Disco-sobre-disco.	fatiga
Rotación de cuatro esferas	fatiga
Elemento de rolado sobre placa.	fatiga

Tabla 4.1.- Pruebas tribológicas de uso común.

Una mejor descripción de cada una de las pruebas se hace en ^[5]. Así como estas, existen otras pruebas, no obstante la mayoría de las veces aunque se este hablando de una misma prueba, los equipos y sus diseños varían significativamente de acuerdo al país de origen, a la marca, etc. Sin embargo, hay condiciones que no varían, como lo es la cinemática del mecanismo de desgaste analizado, a lo cual se puede hacer referencia en el estudio que se proponga (i.e. Prueba de espiga sobre disco o block sobre disco).

A raíz de esta situación es necesario mantener las condiciones mínimas necesarias para la obtención de resultados confiables, tales como: limpieza, calibración y manejo adecuado del equipo, así como de cada uno de los factores que intervienen en las prueba tribológicas en consideración.

Referencias.

- [1] Metals Handbook
Properties and selection iron and steel.
Vol. 1, 1972.
- [2] ASM Handbook
Tribology.
Vol. 18, ASM International, 1992.
- [3] K - H. Zum Gahr
Microestructure and wear of materials.
Elsevier, 1987.
- [4] H. Czichos
The principles of systems analysis and their applications to tribology
ASLE, Trans. 1974.
- [5] J. Jimenez
Tesis de maestría “Resistencia al desgaste de un aluminio termotratable”.
UNAM, México D.F., 1995.

CAPÍTULO V.

5.- PRUEBA ESPIGA-SOBRE-DISCO (PIN-ON DISK).

5.1.- Principio de operación.

Predecir el comportamiento de la superficie de los materiales involucra un sin número de situaciones que deben de considerarse y que muchas veces no están relacionadas con las propiedades que se conocen comúnmente. Variables como la temperatura, lubricación, presión de contacto y velocidad superficial pueden tener un gran impacto sobre el desgaste o la fricción entre dos superficies.

Con el fin de manejar de manera adecuada los efectos de estas variables, los diseñadores de equipos de prueba ofrecen diferentes métodos y sistemas de prueba para el análisis de desgaste en materiales bajo la simulación de sistemas de operación y medios ambientes determinados.

La prueba básica Pin-on-disk o Espiga-sobre-disco, tal y como la define la ASTM G99 ^{[1], [5]}, consiste en un disco o espiga rotatoria, los cuales se encuentran en contacto mutuo, y con una carga aplicada por medio de un brazo, palanca o algún otro mecanismo, lo que da como resultado una trayectoria circular sobre la superficie del disco. El desgaste se mide en términos del volumen perdido tanto de la espiga como del disco o bien de alguno de los dos dependiendo sea el caso ^[2]. El análisis de los datos obtenidos en este tipo de pruebas generalmente incluye el análisis de las marcas generadas por el desgaste sobre el disco y las espigas de prueba, graficando el efecto del desgaste sobre el perfil de la parte desgastada ^{[3], [4]}. A pesar de que este tipo de pruebas proporciona medidas precisas del desgaste, hay que considerar que también las mediciones son dependientes del tiempo, por lo que en el caso de que se deseen hacer comparaciones, además de mantener las mismas condiciones de prueba se deben realizar en un mismo periodo de tiempo. Así como ésta observación en el desarrollo de las pruebas, existen otras características que se deben de considerar para el desarrollo de nuevos equipos, sin embargo, es importante tener presente las características principales de cualquier equipo de prueba, ya que al ser consideradas y con ayuda de un procedimiento adecuado en el desarrollo de la prueba, los alcances obtenidos resultan ser bastante substanciales.

5.2.- ASTM: G99 - 90^{ε1}.

5.2.1.- Método de pruebas estándares para pruebas de desgaste con máquinas Pin-on-disk (Espiga-sobre-disco).

A este estándar se le a asignado la designación G 99, el número inmediato siguiente es el año de la designación original, o en el caso que está halla sido revisada, el año de la última revisión. El número entre paréntesis es el año de la última reacreditación. El superíndice epsilon (ϵ) indica un cambio de editorial a partir de la última revisión o reacreditación ^[1], ^[6].

A.- Alcances.

A.1.- Este método describe un procedimiento de laboratorio utilizando un máquina Pin-on-disk (Espiga-sobre-disco) para determinar el desgaste en materiales sometidos a deslizamiento. Los materiales se examinan en pares bajo una condición nominal no-abrasiva. Se describen las principales áreas de atención experimental al utilizar este tipo de máquina para medir el desgaste. El coeficiente de fricción en algunos casos también puede ser determinado.

A.2.- Las unidades manejadas en este estándar son las del sistema SI.

A.3.- Dentro de este estándar no se consideran los problemas de seguridad que se puedan presentar al aplicarse, por lo que es responsabilidad del usuario el establecer las condiciones de seguridad pertinentes, así como las limitaciones de la prueba.

B.- Resumen del método de prueba.

B.1.- En la prueba Pin-on-disk (Espiga-sobre-disco), se requieren de dos especímenes, un pin o espiga (este último es nombre que su utilizará en adelante) con un radio determinado en las puntas, el cual se coloca de manera perpendicular sobre un disco plano. En algunos casos se utiliza una bola rígida como probeta. La máquina de prueba es la que origina el movimiento rotatorio bien sea de la espiga o del disco. En cualquiera que sea el caso, la trayectoria de deslizamiento es un círculo descrito sobre el disco. El plano del disco puede estar orientado horizontal o verticalmente.

Nota 1.- El desgaste puede variar de acuerdo a las orientaciones en que este se genere.

B.1.1.- La espiga de prueba se presiona sobre el disco con a una carga determinada, la cual generalmente se genera con un brazo o palanca donde se colocan los pesos. También se han utilizado otros mecanismos de carga como lo son neumáticos e hidráulicos.

Nota 2.- El desgaste puede variar dependiendo de los diferentes mecanismos de carga utilizados.

B.2.- Los resultados de desgaste se obtienen por pérdida de volumen del disco y/o de la espiga los cuales se reportan por separado. Cuando dos materiales diferentes son analizados se recomienda que ambos se prueben en las dos posiciones, es decir como espiga y como disco.

B.3.- La cantidad de desgaste se determina al medir las dimensiones lineales de cada espécimen, antes y después de cada prueba o pesando los especímenes antes y después de cada prueba. Si se utilizan las dimensiones lineales, el cambio de longitud o de forma de la espiga y el cambio de profundidad o forma del disco, se determina por cualquier técnica metrológica disponible, como lo puede ser perfilometría o alguna otro medidor de distancia electrónico. Las mediciones lineales obtenidas se pueden convertir a volumen (en milímetros cúbicos), utilizando las relaciones geométricas apropiadas. Es más común utilizar este tipo de medición, puesto que para medir la pérdida de peso se necesita mucho mayor precisión. Si se utiliza la pérdida de masa como método de evaluación del desgaste, éste se puede convertir a pérdida de volumen utilizando el valor de densidad apropiado del material del espécimen analizado.

B.4.- Los valores de desgaste se obtienen generalmente con relaciones de distancia de: deslizamiento-velocidad-carga. En la tabla 5.1^{III}, se presenta un ejemplo del planteamiento de datos para análisis de pruebas, sin embargo, dependiendo los propósitos de la prueba y/o estudio éstos pueden variar.

Características geométricas de la espiga	Características geométricas del disco	Composición química	Microestructura	Dureza	Rugosidad	Número de pruebas	Distancia de deslizamiento	Desgaste

Tabla 5.1.- Planteamiento de datos para pruebas.

B.5.- Los resultados obtenidos en las pruebas de desgaste, se pueden reportar en gráficos de volumen contra distancia de deslizamiento, utilizando diferentes especímenes para diferentes distancias. Dichas gráficas pueden mostrar un comportamiento no lineal sobre determinados intervalos y un comportamiento lineal sobre otros. Las causas de que esto suceda pueden ser muchas, sin embargo, es necesario tener presente las condiciones del sistema de prueba del material y del equipo para un análisis más detallado.

C.- Significado y uso.

C.1.- La cantidad de desgaste para cualquier sistema generalmente dependerá del número de factores del sistema que intervengan, como lo son: carga, características de la máquina, velocidad de deslizamiento, distancia de deslizamiento, el medio ambiente donde se desarrolla la prueba y las propiedades del material. El valor de cualquier prueba de desgaste radica en predecir el rango de desgaste de las combinaciones del material. Puesto que la prueba Pin-on-disk (Espiga-sobre-disco), no tiene como característica principal el duplicado de todas las condiciones originales de servicio como lo son: la lubricación, carga, presión, geometría de contacto, la remoción de las partículas de desgaste, presencia de medios corrosivos, etc., no existe ninguna garantía de que la prueba predecirá el rango de desgaste para alguna otra condición que no sea la utilizada en la prueba.

D.- Equipo de pruebas.

D.1.- Descripción general.- La figura 5.1, muestra un dibujo esquemático de un sistema de prueba típico Pin-on-disk (Espiga-sobre-disco). Un sistema de prueba típico consiste básicamente de: un eje conductor (driven spindle), un chuck que genere el movimiento rotatorio del disco, un portaprobetas, y un brazo o palanca que genere la presión de la espiga sobre el disco mediante la aplicación de una carga determinada. En otros tipos de sistemas, la espiga es la que presenta el movimiento rotatorio y el disco permanece fijo; sin embargo, para cualquiera que sea el caso la trayectoria descrita será un círculo, el cual se genera por los pasos sucesivos de la espiga sobre el disco. El sistema puede tener un medidor de la fuerza friccionante.

D.2.- Motor de giro (Motor drive).- Un motor de velocidad variable capaz de mantener la velocidad constante (± 1 de la razón de carga total del motor de velocidad), bajo la carga requerida. El motor debe de estar montado de tal modo que las vibraciones no afecten las mediciones. Las velocidades de rotación varían de acuerdo al modelo de la máquina.

D.3.- Contador de revoluciones.- La máquina debe estar equipada con un contador de revoluciones o bien con un equivalente que mida las revoluciones del disco y que preferentemente tenga la habilidad de apagar la máquina después de un determinado número de revoluciones.

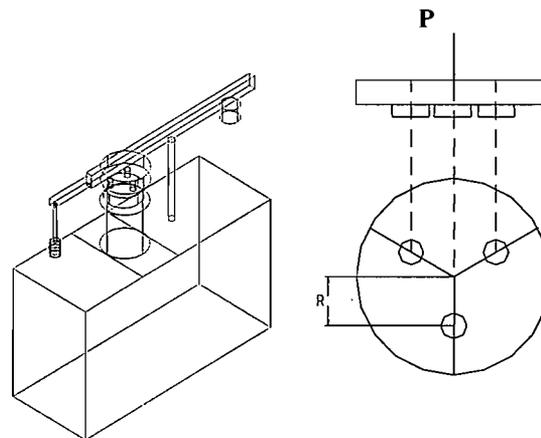


Figura 5.1.- Equipo de pruebas.

D.4.- Portaprobetas y brazo o palanca.- Dentro de un sistema típico, el portaprobetas está sujeto a un brazo o palanca que tiene un pivote. Al ir agregando pesos (las cuales pueden ser la opción para generar la carga), se va generando la fuerza proporcional a la masa de los pesos aplicados. Idealmente el pivote del brazo debería estar localizado en el plano de contacto del desgaste con el objeto de evitar el efecto de fuerzas extrañas debido a la fricción que se genera por el deslizamiento. El brazo o palanca debe de estar diseñado de tal modo que los efectos de vibración se reduzcan al máximo.

D.5.- Sistema de medición de desgaste.- Los instrumentos utilizados para medir la precisión del desgaste deben tener una precisión mínima de $2.5 \mu\text{m}$. En el caso de balanzas se necesita una

sensibilidad mínima de 0.1 mg. Dependiendo de la cantidad de desgaste que se presente la precisión requerida puede ser mayor.

E.- Características y preparación de los especímenes de prueba.

E.1.- Materiales.- Este tipo de pruebas se puede aplicar a una gran variedad de materiales. El único requisito es que el espécimen tenga las dimensiones adecuadas y que posteriormente pueda ser preparado o adecuado para la prueba, de tal modo que este soporte los esfuerzos generados sobre la prueba sin daños o cambios bruscos, como podrían ser flexión o en caso extremo falla del material (fractura, agrietamiento, etc.). Los materiales que son utilizados deben ser caracterizados de acuerdo a sus dimensiones, acabado superficial, tipo de material, forma, composición, microestructura, tratamientos térmicos a los que ha sido sometido y dureza.

E.2.- Especímenes de prueba.- El espécimen típico de prueba es una espiga con punta cilíndrica o esférica. Los especímenes típicos presentan un diámetro de entre 2 y 10 mm, mientras que los diámetros típicos de los discos varían entre 30 y 100 mm por un espesor de entre 2 y 10 mm.

E.3.- Acabado superficial.- Se recomienda una rugosidad superficial máxima de 0.8 μm (32 μpulg) como media aritmética.

Nota 3.- La rugosidad de la superficie hace que la medición de las marcas del desgaste se dificulten.

E.3.1.- Se debe de tener cuidado en la preparación de la superficie, para no dañar las capas subsuperficiales de tal modo que esto se vea reflejado en la prueba. En algunos programas especiales se requiere de una preparación superficial especial, la cual se debe de reportar en el planteamiento de pruebas.

F.- Parámetros de prueba.

F.1.- Carga.- Los valores de la carga se dan en Newtons.

F.2.- Velocidad.- La velocidad relativa en las áreas de contacto se da en metros por segundo.

F.3.- Distancia.- La distancia de deslizamiento acumulada se da en metros.

F.4.- Temperatura.- La temperatura de interés del espécimen o del disco, es la de la región de contacto o desgastada.

F.5.- Atmósfera.- La atmósfera (humedad del laboratorio, lubricación, etc.) del laboratorio debe considerarse.

G.- Procedimiento.

G.1.- Inmediatamente antes de analizar, y antes de medir o pesar los especímenes, se deben limpiar y secar cuidadosamente de tal modo que toda materia extraña sea removida. Para esto se puede utilizar cualquier agente limpiador que no forme películas. Posteriormente se seca la superficie y se remueve el líquido utilizado para limpieza. En el caso de materiales ferromagnéticos que presenten residuos, se deben desmagnetizar. Cualesquier que sea el método de limpieza utilizado debe de reportarse.

G.2.- Las mediciones lineales y el peso deben de ser del orden de $2.5 \mu\text{m}$ y 0.0001 mg .

G.3.- Coloque el disco cuidadosamente en el portadiscos de tal modo que quede perpendicular (± 1) al eje de acción de la espiga.

G.4.- Coloque la espiga en el portaprobetas, en el caso de que sea necesario ajustar ajústese perpendicular (± 1) al eje del disco.

G.5.- Calibre el peso necesario para desarrollar la fuerza que se requiera aplicar sobre el disco.

G.6.- Encienda el motor y calibre la velocidad requerida para la prueba sin que el disco y la espiga estén en contacto. Detenga el motor.

G.7.- Programe el número de revoluciones requeridas para la prueba.

G.8.- Comience la prueba con los especímenes en contacto con la carga apropiada. Al alcanzar el número de revoluciones requeridas o programadas en la prueba, detenga la prueba. La prueba no debe ser interrumpida o reinicializada.

G.9.- Retire los especímenes de prueba, límpielos y analice los efectos del desgaste como lo son: desprendimiento de material, surcos, corte, fracturas, etc.

G.10.- Mida o pese los especímenes según sea el método utilizado.

G.11.- Repita las pruebas un número de veces suficiente para tener suficientes datos de análisis y así el promedio obtenido sea más preciso.

H.- Cálculo y reporte de datos.

H.1.- Los datos de desgaste obtenidos deben de ser reportados como pérdida de volumen (mm^3).

H.1.1.- Utilice las siguientes ecuaciones⁹ para calcular la pérdida de volumen cuando la espiga termina en forma esférica con radio R, el disco es inicialmente plano y bajo la premisa de que sólo uno de los especímenes sea el que se desgastó notablemente.

⁹ **Nota.-** Se describen algunos en ejemplo en el apéndice.

$$W = \pi(d)^4/64R \quad \dots 5.1$$

donde.

- W.- Es volumen perdido en la parte esférica de la espiga, mm³
- d.- Es el diámetro de la marca desgastada, mm
- R.- Es el radio de la esfera, mm

Considerando que el desgaste en el disco no fue significativo.

Existe una relación geométrica que es correcta en 1% para (diámetro de la marca desgastada/radio de la esfera) <0.3, y correcta en un 5% (para el ancho de la trayectoria desgastada/radio de la esfera) <0.7. La ecuación exacta se da en el apéndice.

En el caso de que se considere que el desgaste o el volumen perdido en la espiga fue nulo, se tiene:

$$W = \pi r h^3/64R \quad \dots 5.2$$

donde:

- W.- Es volumen perdido en la parte esférica de la espiga, mm³
- r.- Es el radio de la trayectoria desgastada, mm
- h.- Es ancho de la trayectoria desgastada, mm
- R.- Es el radio de la esfera, mm

Existe una relación geométrica que es correcta en 1% para (espesor de la trayectoria desgastada /radio de la esfera) <0.3, y correcta en un 5% para (el espesor de la trayectoria desgastada/radio de la esfera) <0.8. La ecuación exacta se da en el apéndice.

H.1.2.- En el caso de que se utilice alguna otra geometría para las probetas de prueba, el desgaste o pérdida de volumen se calcula con las relaciones geométricas adecuadas, de tal modo que estas justifiquen la geometría de la probeta antes y después de la prueba.

H.1.3.- Las marcas del desgaste sobre las probetas, deben de medirse al menos en dos lugares diferentes de las probetas y posteriormente obtener un promedio.

H.1.4.- En los casos donde tanto el disco como la espiga se desgasten significativamente, será necesario realizar las mediciones de los cambios superficiales en ambas probetas. Se sugiere que se utilice un método de perfilometría, puesto que este es de los únicos que dan la forma última de las probetas y así poder determinar el cambio de volumen debido al desgaste. En el caso del disco, la plantilla de la trayectoria de desgaste promedio puede ser integrada para obtener la trayectoria del desgaste sobre toda la sección transversal del disco, y posteriormente multiplicado

por la longitud promedio de la trayectoria para así obtener el desgaste total del disco. En el caso de la espiga, la plantilla de la marca del desgaste puede ser medida en dos direcciones ortogonales, obteniendo los resultados promedio y posteriormente multiplicarla por una revolución para calcular el desgaste de la espiga.

H.1.5.- En el caso de que se presente pérdida de masa, ésta debe ser utilizada en los laboratorios para compararla con materiales de densidades equivalentes. Este método reporta el desgaste como pérdida de volumen por lo que no deben de presentarse confusiones ocasionados por la variación de densidad. No obstante, al obtener el volumen a partir de la pérdida de masa, es importante tener bien definidas las densidades de los materiales de prueba, con el fin de evitar confusiones.

H.1.6.- Utilice la siguiente ecuación para obtener la conversión de pérdida de masa a pérdida de volumen:

$$\text{Pérdida de volumen (mm}^3\text{)} = [(\text{masa perdida (gr)}) / \text{densidad (gr/cm}^3\text{)}] \times 1000 \quad \dots 5.3$$

H.1.7.- Para el caso de que los materiales presenten transferencia del material uno respecto del otro, la pérdida de volumen no representará de manera adecuada la severidad del desgaste, por lo que en estos casos éste método no debe ser utilizado.

H.1.8.- El coeficiente de fricción, debe de ser reportado cuando sea posible, describiendo las condiciones bajo las cuales se realiza la medición, por ejemplo: etapa inicial, etapa estable, etc.

H.1.9.- Es importante contar con las especificaciones adecuadas de los materiales de prueba. Como mínimo, un reporte debe especificar: el tipo de material, la forma, los tratamientos térmicos a los que fue sometido, el acabado superficial y los procedimientos de preparación de los especímenes y si es necesario la prueba de indentación para dureza.

I.- Precisión y prevenciones de medición.

I.1.- La medición y las prevenciones en las mediciones obtenidas mediante esta prueba dependerán de los parámetros elegidos.

I.2.- La reproducción de las pruebas realizadas sobre un mismo material dependerá de la homogeneidad del material, maquinado e interacción del material, así como del seguimiento al pie de la letra de las instrucciones por el operador de máquina.

I.3.- Si se comparara la exactitud de la medición de otras propiedades del material como lo son dureza, densidad o expansión térmica, se observaría que las variaciones normales dentro de los procedimientos tenderán a reducir la exactitud de este método de prueba; sin embargo, la máxima variación permitida es de un 25% ^[1].

I.4.- Para cualquier serie de pruebas, se deben de considerar todos los valores obtenidos en las pruebas a pesar de que se salgan del rango marcado.

I.5.- En el caso de que dos o más laboratorios deseen comparar este tipo de pruebas e información de las mismas, se deben de considerar los rangos de variación aceptables de sus equipos de manera independiente. Con el fin de obtener las variaciones permitidas, la selección del tipo y tamaño de prueba debe ser bajo acuerdo de los laboratorios participantes y bajo los métodos estadísticos recomendados en la práctica E122, E177 y STP 15D.

Referencias.

- [1] ASTM standars.
- [2] E122 Practice for choice of sample size to estimate a measure of quality for a lot or process
- [3] E177 Practice for use of terms precision an bias in ASTM test methods
- [4] E178 Practice for dealing with outlying observations
- [5] G40 Terminology ralating to wear and erosion
- [6] Manual on Quality Control of Materials, ASTM STP 15D, Am. Soc. Testing Mats, 1951.

CAPÍTULO VI.

6.- CLASIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE ACEROS PARA HERRAMIENTAS.

6.1.- Clasificación de aceros para herramientas.

Resultaría difícil encontrar una definición de los aceros para herramientas que satisfaga las expectativas tanto de los consumidores como de los productores. Para los proyectistas, cualquier pieza de acero utilizada para hacer una herramienta es un acero para herramientas, por otro lado, muchas de las aleaciones de acero principalmente compuestas de aceros para herramientas hechos para ser utilizados en aceros para herramientas, son utilizados en otras aplicaciones y no para fabricar herramientas. Como un ejemplo, los aceros para alta velocidad son ampliamente utilizados en muelles o resortes que deben de resistir el ablandamiento debido a altas temperaturas, otros tipos de aceros para herramientas se utilizan para hacer electroimanes, válvulas para motores de combustión interna o para cojinetes de diversos tipos. Como se ve cada una de estas situaciones y muchas otras, dificultan el poder definir de manera adecuada a los aceros para herramientas en un contexto general que satisfaga tanto a los consumidores como a los productores.

Los productores de aceros para herramientas consideran que los aceros que producen, son aceros finos y de alta calidad, sin importarles si estos son utilizados para fabricación de herramientas o no. Con el fin de contar con una clasificación de algún modo formal, a continuación se mencionarán sólo aquellos aceros que son utilizados específicamente para la fabricación de herramientas ^[1].

Resulta importante establecer una clasificación de los aceros para herramientas, la cual divida una numerosa cantidad de composiciones, en pequeños grupos que permitan compararlos y al mismo tiempo evaluarlos ^[2]. De hecho, una clasificación adecuada facilitará la selección de los mismos para aplicaciones específicas. A pesar de que los aceros para herramientas generalmente son de diversas composiciones, no se puede realizar una clasificación como la realizada por la SAE, la cual divide algunos de los aceros en grupos utilizando como criterio de clasificación a sus componentes predominantes, como en el caso de los aceros al carbono. Lo que sucede con los aceros para herramientas, es que en los aceros al carbono y de baja aleación sus composiciones permitirían dicha clasificación, sin embargo, en el caso de los aceros para herramientas de alta aleación, los contenidos de carbono son muy similares, por lo que no se podría realizar una clasificación basada en su contenido de carbono. Además, los aceros para herramientas no pueden ser clasificados por un componente predominante de su composición, ya que este puede ser cambiado parcialmente o en su totalidad sin que presente cambios radicales en sus propiedades. Por lo consiguiente, en el caso de que se desee realizar una clasificación de los

aceros para herramientas de acuerdo a su composición se presentaría un problema, ya que aunque hay aceros que presentan variaciones notables en cuanto a su composición, las propiedades que presentan son las mismas (por ejemplo, los aceros para alta velocidad o los aceros de alto contenido de carbono - cromo).

Por otra parte, una clasificación de los aceros para herramientas de acuerdo a sus aplicaciones y propósitos resultaría útil para algunos tipos de acero para herramientas, pero no para todos. Un ejemplo del inconveniente de este criterio de selección, es que se podrían clasificar aceros que se utilicen en extrusión, otros que se utilicen para trabajo en caliente, otros para estirado, etc.; sin embargo, no se pueden clasificar todos los aceros que se utilicen para hacer una tapa, ya que esta puede ser fabricada desde un acero para herramientas hasta de acero de alta velocidad, por lo que sí se realiza la clasificación de los aceros para herramientas de estas forma resultaría poco útil.

La AISI (American Iron and Steel Institute) tiene una manera de identificar a los aceros para herramientas y presenta una clasificación en la cual se proponen grupos mayores, tal y como se muestra a continuación:

- Aceros para herramientas endurecidos en agua.
- Aceros para herramientas resistentes al choque.
- Aceros para propósitos especiales.
- Aceros para trabajo en frío.
- Aceros para trabajo en caliente.
- Aceros para alta velocidad.

A cada uno de estos grupos se le ha asignado una letra, tal y como se muestra a continuación:

- Aceros para herramientas endurecidos en agua - W.
- Aceros para herramientas resistentes al choque - S.
- Aceros para propósitos especiales:
 - L.- aceros de baja aleación.
 - F.- aceros tipo carbono - tungsteno.
 - P.- aceros para moldes (P1 a P19, incluye a los aceros de bajo contenido de carbono; P20 a P39, incluye a otros tipos)
- Aceros para trabajo en frío:
 - Q.- aceros endurecidos en aceite.
 - A.- aceros de media aleación endurecidos al aire.
 - D.- aceros de alto contenido de carbono y alto contenido de cromo.
- Aceros para trabajo en caliente - H:
 - H1 a H19, incluye los aceros base cromo.
 - H20 a H 39, incluye los aceros base tungsteno.
 - H40 a H59, incluye los aceros base molibdeno.
- Aceros para alta velocidad:
 - T.- aceros base tungsteno.
 - M.- aceros base molibdeno.

En todos los grupos excepto el primero, se utiliza como criterio de clasificación su propósito o fin. En el caso del primer grupo, se utiliza como criterio de agrupamiento el medio de temple. Dentro de los grupos principales existen varias subdivisiones, en el caso de los aceros para trabajo en frío, dichas subdivisiones utilizan las denominaciones O, A y D, las cuales se basan en el medio de temple utilizado y en su similitud de composición química y aplicaciones. Por otra parte, hay aceros endurecidos en aceite, aceros de media aleación endurecidos al aire (ambos basados en el proceso de temple), y aceros de alto contenido de carbono alto contenido de cromo (basados en su similitud de propiedades).

El sistema de clasificación de la AISI, contempla un total de 84 composiciones básicas de aceros para herramientas, de las cuales 40 son utilizadas de manera específica. De hecho en Estados Unidos de Norte América, se manufacturan aproximadamente 180 aceros. Con el fin de clasificar los aceros restantes, en los cuales no se contempla de manera primordial su aplicación ya que se caracterizan para ser utilizados en aplicaciones especiales, se tuvo que proponer otra clasificación de fácil comprensión.

Esta clasificación consta básicamente de 7 grupos principales: grupo 100, aceros al carbono para herramientas; grupo 200, aceros para herramientas de baja aleación; grupo 300, aceros para herramientas para propósitos especiales; grupo 400, aceros para dados para trabajo en frío; grupo 500, aceros para dados para trabajo en caliente; grupo 600, aceros para alta velocidad; grupo 700, aceros para herramientas de interés histórico.

Cada uno de los grupos presenta una o más clases, las cuales se identifican de manera particular por un número que consta de tres dígitos:

$$\underline{X}_1 \underline{X}_2 \underline{X}_3$$

donde:

- \underline{X}_1 .- Indica a que grupo pertenece.
- $\underline{X}_1 \underline{X}_2$.- El primero junto con el segundo indican la clase.
- $\underline{X}_1 \underline{X}_2 \underline{X}_3$.- Los tres dígitos juntos indican el acero y la clase.

En un principio puede parecer ilógico, el utilizar una clasificación en la cual algunos aceros para herramientas se clasifican de acuerdo a su uso y otros por su composición o por ciertas propiedades, e incluso otros por su tratamiento térmico, sin embargo, esta clasificación se ha establecido poco a poco tanto en el ámbito literario como en la industria, por lo que puede ser la mejor opción cuando se tenga que elegir. No obstante, al irse familiarizando con esta clasificación, cuando se escuche de un acero para alta velocidad, de un acero endurecido en aceite o de un acero para herramientas para acabado rápido, se sabrá que el primero es un acero clasificado de acuerdo a sus propiedades, el segundo de acuerdo a su medio de endurecimiento y el tercero por su aplicación específica.

6.2.- Selección de aceros para herramientas.

Idealmente para realizar la selección de un acero para herramientas se deben de considerar sus *propiedades metalúrgicas* de acuerdo a los requerimientos de la herramienta. Muchas de las herramientas presentarán resultados satisfactorios en diversos trabajos, y la duración o vida útil de cada una de ellas se obtendrá al comparar su productividad, funcionalidad y su costo, en pocas palabras la calidad de su *diseño*. La última condición base utilizada para realizar una selección adecuada de un acero para herramientas, es el costo final por unidad de partes producidas por la herramienta.

Puesto que estas bases involucran los conceptos tanto de productividad, funcionalidad y costo, resulta lógico que en el criterio de selección de un acero para herramientas, se realice por separado de acuerdo a dos factores como se muestra a continuación: a) primeramente prediciendo la capacidad de producción que tendrá el acero seleccionado en la tarea a realizar, es decir su funcionalidad y b) segundo, analizando las limitaciones de manufactura del acero para herramientas seleccionado, en términos de su producción.

6.2.1.- Predicción de la funcionalidad.

Los aceros para herramientas se utilizan para diversos propósitos, sin embargo, estos se pueden clasificar en cinco tipos de aplicaciones principales, como se muestra en al tabla 6.1^[4].

Herramientas	para:
1.- Formado	a) Formado en caliente b) Formado en frío
2.- Cizallado	a) Corte de tochos b) Punzonado c) Cuchillas y laminas de cizallado d) Calado
3.- Remoción de material	a) Corte de metales b) Corte de no metales c) Descascarado, rasurado
4.- Conformado	a) Fundición en matriz b) Moldeado de plásticos c) Moldeado de cerámicos d) Moldeado de polvos
5.- Uso misceláneo	a) Partes para desgaste b) Herramientas que operen por percusión o impacto c) Galgas

Tabla 6.1.- clasificación de los aceros para herramientas de acuerdo a sus aplicaciones

Las herramientas de formado, ya sea para trabajo en caliente o trabajo en frío, donde se involucran herramientas para aplicaciones de forja en caliente, herramientas de conformado por prensa, herramientas de embutido profundo, herramientas para extrusión, herramientas para

fileteados, etc., generalmente en una parte de su tiempo de trabajo están sometidas a contacto por deslizamiento con otros metales sólidos y también, pueden estar sometidas a presión por cortos tiempos durante su operación. Debido a esto, este tipo de herramientas requiere primeramente de una alta resistencia al desgaste, y segundo de una buena tenacidad y maquinabilidad, tabla 6.2,¹⁴. Las herramientas para trabajo en caliente además de esas propiedades requieren, que su dureza permanezca a altas temperaturas.

Las herramientas de corte están sujetas a altos esfuerzos cortantes, lo cual requiere una alta resistencia al desgaste y alta tenacidad, para mantener el filo de la herramienta y las mismas dimensiones en el corte. Algunas herramientas requieren poca distorsión en su dureza.

Las herramientas para remoción de material, utilizadas para maquinado requieren que su dureza se mantenga al calentarse y además requieren de una alta resistencia al desgaste, también en algunos casos se requiere tenacidad.

Las herramientas para moldeo, son utilizadas no sólo para plásticos, sino también para metales o en la metalurgia de polvos donde se presenta un contacto por deslizamiento, de ahí que requieren una buena resistencia al desgaste.

Las herramientas de uso misceláneo, como lo son las herramientas para partes sometidas a trabajo de desgaste, requieren de una alta resistencia al desgaste; las herramientas de percusión, requieren de alta tenacidad; y las galgas requieren de alta dureza, buen acabado y estabilidad dimensional.

Ahora bien, el primer paso para la selección de un acero para herramientas se obtiene al determinar cual es el requerimiento más importante de la herramienta que se requiere.

6.2.1.1.- Factores que determinan la funcionalidad en la selección de un acero para herramientas.

El primer paso en la selección de un acero para herramientas, es determinar su funcionalidad. Con el fin de determinar su funcionalidad en una determinada aplicación, hay cuatro propiedades básicas que deben de considerarse en los aceros para herramientas endurecidos. Tres de ellas se deben de considerar como factores primarios o mayores. Estas 3 propiedades en orden jerárquico son: *resistencia al desgaste, tenacidad y dureza en caliente*, tabla 6.2¹⁴. Al obtener buenas características de estas tres condiciones en la selección de un acero para herramientas, se puede garantizar una buena funcionalidad. Sin embargo, existen otros factores de selección a los cuales se les considera factores menores o secundarios, los cuales se caracterizan por no ser requeridos en todas las aplicaciones. Estos factores son: trabajo de endurecimiento (se refiere al límite elástico y al límite de cedencia), la profundidad del endurecimiento (se refiere a los esfuerzos internos característicos del acero), y el tamaño de grano.

Al listar estas propiedades para cada uno de los aceros considerados para un propósito determinado, se debe de poder realizar de manera inmediata una selección de un acero o de una

clase de aceros para herramientas. En la tabla 6.2⁽¹⁾, se maneja una escala numérica del 1 (bajo) al 9 (alto) para evaluar la resistencia al desgaste, la tenacidad y la dureza en caliente. De esta forma se tiene una referencia de evaluación que facilitará la selección de un acero acorde a la aplicación deseada. Por otra parte, para los factores de selección menores como la dureza, se utiliza la escala de Rockwell C; para el tamaño de grano se utilizan los rangos de fractura en dureza total de la prueba Shepherd, para la profundidad de la dureza se utilizan las letras S (superficial o suave), M (medio) y D (profundo).

Si la herramienta se usa para	Factores de consideración mayores	Factores de consideración menores	Bajo estas condiciones	Factores mayores a considerar (a)			Grupo potencial, clase o acero
				Resist. al desgaste	Tenacidad	Dureza en caliente	
Remoción de material	Resistencia al desgaste y al efecto de ablandamiento por calor	Tenacidad	Cortes ligeros, bajas velocidades	4 a 8	1 a 3	1 a 6	100, 340, 600
			Cortes pesados, altas velocidades	7 a 9	1 a 3	8 a 9	600
Corte	Resistencia al desgaste y tenacidad	Seguridad en el endurecimiento y distorsión leve durante el mismo	Stock ligeros, carreras cortas	4 a 6	1 a 7	(b)	100, 410, 420
			Stock ligeros, carreras largas	6 a 9	1 a 7	(b)	420, 430, 440, 600
			Stock pesados, carreras cortas	2 a 4	7 a 9	(b)	100, 310, 520
			Stock pesados, carreras largas	3 a 5	7 a 9	(b)	320, 520
Conformado	Resistencia al desgaste	Maquinabilidad y tenacidad	En frío, carreras cortas	4 a 6	1 a 7	(b)	100, 410, 420
			En frío, carreras largas	7 a 9	1 a 4	(b)	430, 440, 600
			En caliente, carreras cortas	3 a 6	6 a 9	5 a 7	100, 211, 230, 520,
			En caliente, carreras largas	4 a 6	6 a 9	7 a 9	530
Embutido	Resistencia al desgaste	Distorsión ligera durante el endurecimiento	Carreras cortas	4 a 6	1 a 7	(b)	530, 540
			Carreras largas	7 a 9	1 a 4	(b)	
Extrusión	Tenacidad, resistencia al desgaste y al efecto de ablandamiento por calor	•••	En frío	4 a 9	1 a 7	(b)	100, 410, 420
			En caliente	3 a 6	6 a 9	5 a 7	340, 430, 440, 600 100, 340, 400, 540, 600 500
Rolado	Resistencia al desgaste	•••	Carreras cortas	4 a 6	1 a 7	(b)	100, 410, 420
			Carreras largas	7 a 9	1 a 4	(b)	340, 430, 440, 600

(a) En el texto se describen las propiedades y sus respectivos valores

(b) Esto es sólo importante para trabajo en caliente, como lo es conformado, extrusión o remoción de material.

Tabla 6.2.- Primer paso en la selección de un acero para herramientas.

Además de considerar estos factores de acuerdo a los requerimientos de la herramienta deseada, se debe tener en cuenta que existen ciertas relaciones entre cada uno de ellos. Estas relaciones pueden afectar o beneficiar directamente la funcionalidad del acero para herramientas seleccionado. En el caso de la resistencia al desgaste, la dureza es uno de los factores que generalmente favorece esta propiedad, sin embargo, esto no siempre sucede ya que en los procesos de desgaste intervienen una gran cantidad de variables y no sólo la dureza. Por otra parte, la tenacidad de los aceros para herramientas varía ampliamente con el contenido de carbono, condiciones superficiales de la herramienta y tamaño de la sección. Una de las principales variables que también afecta a la tenacidad es la dureza misma, la cual afecta tanto al límite de cedencia, como la ductilidad, factores importantes en esta propiedad. También hay que tener en cuenta que en dos aceros con la misma dureza la ductilidad puede variar considerablemente, en tanto que el límite de cedencia generalmente no varía. Otro factor que afecta la tenacidad y que no se debe pasar por alto es la temperatura de operación, lo cual es de suma importancia en herramientas para trabajo en caliente. Finalmente, se puede mencionar que otro factor que afecta a la tenacidad es la profundidad del endurecimiento. Como un ejemplo, los aceros para herramientas al carbono y ciertos aceros para herramientas de baja aleación, sólo se pueden endurecer superficialmente o de manera suave y a pesar de su alto contenido de carbono tienen una alta tenacidad.

Para cada uno de estos factores se han registrado diferentes valores obtenidos de manera experimental. Dichos datos se encuentran resumidos en tablas o más aún se encuentran en gráficos que ilustran los efectos de cada uno de los factores antes mencionados, lo cual facilita la selección de un acero para herramientas adecuado de acuerdo a las especificaciones necesarias ^[1], ^[2].

6.2.2.- Limitaciones de manufactura.

El segundo paso para la selección de un acero para herramientas es realizar un análisis de las limitaciones de manufactura, lo cual afectará directamente el costo y la productividad de la herramienta. Dentro de las limitaciones se encuentran: la disponibilidad del acero (evaluado en un rango entre 1 y 4), el costo del acero (evaluado en un rango entre 1 y 5), su maquinabilidad (evaluado en un rango entre 1 y 9), el medio de temple a utilizar (agua, aceite, aire), la temperatura requerida en el tratamiento de endurecimiento, los cambios dimensionales en el endurecimiento (H, alto; M, medio; L, bajo) y la sensibilidad a la descarburación (H, alta; M, media; L, baja). En el caso del costo, la escala presentada sólo refleja el costo del acero y no el de la herramienta manufacturada, ya que dependiendo la herramienta será el costo, sin embargo, esta escala sirve de ayuda para tener una noción del costo final. Cada uno de estos factores se deben de considerar en la selección de un acero para herramientas, para ello existen tablas y gráficos que involucran dichos factores, lo cual facilita la determinación de las limitaciones de manufactura acorde a cada uno de los factores antes mencionados y a los requerimientos de la herramienta a diseñar. En la tabla 6.3^[4], se presentan las propiedades de algunos aceros evaluadas mediante el sistema mencionado.

Grupo, clase o tipo	AISI	Designación	Resist. al desgaste	Tenacidad	Dureza en caliente	HRC usual de trabajo	Profundidad de endurecimiento	Disponibilidad	Costo	Maquinabilidad	Medio de temple	Temperatura de endurecimiento °F	Rango de HBn después de recocido
100	W	Acero al C.	2 a 4 (a)	3 a 7 (b)	1	58 a 65	S	4	1	9	W	1400 a 1550	159 a 202
211	L	Acero de baja aleación cromo, <0.65 C	2 a 3 (a)	4 a 6 (b)	2	45 a 64	M	2	1	8	W, O	1400 a 1500	163 a 202
220 221	L	Acero de baja aleación Cromo, >0.65 C	1	7	2	50 a 62	M	3	1	8	W, O	1450 a 1700	163 a 207
232	L6	Acero de baja aleación Níquel, <0.65 C	3	6	2	45 a 62	M	3	1	7	O	1450 a 1550	183 a 212
310	S	Acero para hmta. al Si.	2	8	2 a 3	50 a 60	M	3 a 4	1	8	O	1550 a 1700	183 a 223
320	S	Acero para trabajo en frío al tungsteno	4	8	5	50 a 58	M	3	2	8	O	1650 a 1800	207 a 235
340	F	Acero para acabado al tungsteno	8	2 a 6 (b)	3	64 a 67	S	3	3	6	W	1450 a 1600	183 a 212
410	O	Acero endurecido en aceite	4	3	3	57 a 62	M	3 a 4	1	8	O	1400 a 1500	202 a 229
420	A	Acero endurecido en agua	6	4	5	57 a 62	D	4	1	8	A	1700 a 1800	217 a 255
430	D	Acero con alto carbono alto cromo	8	1 a 2	6	58 a 64	D	3 a 4	3	2 a 3	A, O	1775 a 1875	235 a 262
440	A o D	Aceros resistentes al desgaste	9	1	6	58 a 66	D	2	3	1	A	1700 a 1800	192 a 229
520	H	Aceros al cromo - Molibdeno para trabajo en caliente	3	9	6	38 a 55	D	4	1	8	A	1825 a 1900	202 a 235
530	H	Aceros al cromo - tungsteno para trabajo en caliente	4	6	7	40 a 54	D	3	2	7	A	1850 a 1950	202 a 235
540	H	Aceros al tungsteno para trabajo en caliente	4 a 6	4 a 6	8	40 a 58	D	3 a 4	4	5 a 6	A, O, S	1900 a 2300	202 a 248
600	T o M	Aceros para alta velocidad	7 a 9	1 a 3	8 a 9	63 a 68	D	3 a 4	3 a 5	1 a 5	S, O, A	2175 a 2375	207 a 277

(a) Depende del contenido de carbono. (b) 6 a 7 es endurecido superficialmente; 2 a 4 si se endurece totalmente.

Tabla 6.3.- Propiedades de algunos aceros para herramientas

A pesar de que en cada uno de los factores que se proponen para la selección adecuada de un acero se manejan escalas que deberían facilitar su selección, en la práctica esto no siempre sucede, ya que no es tan simple comparar cada uno de estos factores entre cientos de aceros para herramientas. Primeramente, lo que se recomienda en estos casos es determinar en que grupo se encuentra el acero más adecuado para la tarea propuesta y posteriormente realizar la selección de acuerdo a las características de la herramienta.

6.3.- Comentarios.

Uno de los criterios para evaluar un *diseño* de una herramienta es la calidad del material seleccionado, lo que consecuentemente se refleja en la calidad del diseño mismo; es decir al comparar la productividad, funcionalidad y costo del material seleccionado, se tendrá una noción de la calidad del diseño propuesto ^{[3], [4]}.

Como se puede ver los aceros para herramientas presentan ciertas características que los identifica y que hace posible su selección. Sin embargo, es muy importante mencionar que uno de los factores predominantes en el proceso de selección, o probablemente el más importante *es la resistencia al desgaste*, por lo que resulta importante considerar las condiciones necesarias en los aceros para herramientas para mejorar esta propiedad, de tal modo que se logre eficientizar tanto la calidad de los materiales, como la *calidad del diseño*.

Referencias

- [1] G.A. Roberts, J.C.Hamaker, A.R.Hohnson
Tool steels
American Society For Metals, Metals Park, Ohio 1971.
- [2] Metals Handbook
Properties and selection .
Vol. 1, 1972.
- [3] Selecting Material For Wear Resistance, Guide to Selecting Engineering Materials.
Revista "Advanced Material & Process".
1990.
- [4] ASM Handbook
Tribology.
Vol. 18, ASM International, 1992.

CAPÍTULO VII.

7.- DESARROLLO EXPERIMENTAL.

En un diseño o aplicación idealmente para realizar la selección de un acero para herramientas se deben de considerar sus *propiedades mecánicas* de acuerdo a los requerimientos de la herramienta. Muchas de las herramientas presentarán resultados satisfactorios en diversos trabajos, y la duración o vida útil de cada una de ellas se obtendrá al comparar su productividad, funcionalidad y su costo, en pocas palabras la calidad de su *diseño*. La última condición base utilizada para realizar una selección adecuada de un acero para herramientas, es el costo final por unidad de partes producidas por la herramienta.

De acuerdo a lo mencionado, una vez que se tiene el concepto de diseño el paso siguiente es evaluar las propiedades de los diferentes opciones de materiales para ese determinado propósito. Para determinar la funcionalidad, uno de los parámetros que intervienen y que es de los más determinantes en la obtención de la funcionalidad es la *resistencia al desgaste*. Al obtener una buena resistencia al desgaste se esta dando un gran paso para garantizar una buena funcionalidad, por lo que resulta de suma importancia determinar esta propiedad.

A pesar de que se cuenta con tablas donde se pueden encontrar datos del comportamiento al desgaste de algunos aceros, hay que recordar que estos están basados en aplicaciones particulares, y por la naturaleza variante del fenómeno de desgaste resulta imperante realizar un estudio tribológico de desgaste para cada aplicación dada. En este caso se propone un estudio en un acero H13 para herramientas para trabajo en caliente y considerado como un acero para herramientas de formado. El H13 tiene gran aplicación en la fabricación de dados para extrusión de aluminio y magnesio entre otras aplicaciones. Ahora bien, puesto que lo que nos interesa es determinar el comportamiento en desgaste de el acero H13, se tienen que variar sus propiedades mecánicas para lo cual el acero H13 se evaluó bajo 2 diferentes condiciones de tratamientos térmicos: 1) en estado recocido y b) en estado templado revenido. Puesto que lo que interesa es el comportamiento en desgaste del acero H13, para este estudio se seleccionó como cuerpo contrario un acero M2 de alta velocidad, por tener mejores propiedades mecánicas (resistencia al desgaste, dureza, tenacidad, maquinabilidad, etc.) que el acero H13. De esta forma se garantiza que el mayor desgaste se presente en cuerpo sólido (acero H13) y no en el cuerpo contrario (acero M2), garantizando de esta forma el estudio de desgaste en este acero.

Considerando la metodología propuesta por la norma ASTM G99 - 90^{es}, en cuanto al planteamiento de un estudio de desgaste, el desarrollo experimental se plantea de la siguiente manera:

A) Equipo utilizado.

Los ensayos se realizaron utilizando un equipo de desgaste marca Cygnus II, modelo 51, (figura 7.1) desarrollado por Swansea Tribology Centre. Este es un Equipo Pin-on-disk (Espiga-sobre-disco), diseñado para medir desgaste por deslizamiento en seco o con lubricación. El rango de aplicación de cargas de dicho equipo es de 0.5 kg. a 5 kg. y la aplicación de la carga se realiza en forma axial. El equipo cuenta con una cámara que aísla las piezas del medio ambiente y tiene la posibilidad de aumentar la temperatura interna por medio de resistencias. El registro de la temperatura se obtiene por medio de un galvanómetro. De igual modo se puede variar la velocidad (r.p.m.) en diferentes escalas (0 – 300, 0 – 1000, 0 – 3000), al igual que el torque aplicado que varía dependiendo la escala seleccionada (X1 o X10).

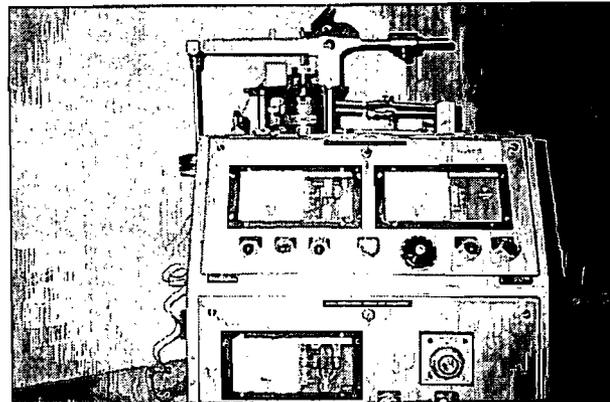
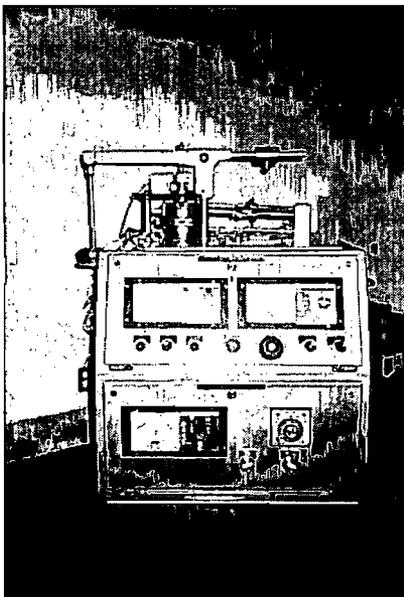


Figura 7.1.- Equipo Pin-on-disk., marca Cygnus II, modelo 51

B) Unidades Utilizadas.

Las unidades manejadas en este estudio son las del SI.

C) Material empleado.

- Para las espigas (figura 7.2), acero H13 para herramientas de conformado mecánico.
- Para el disco (figura 7.3), acero M2 para herramientas de alta velocidad.

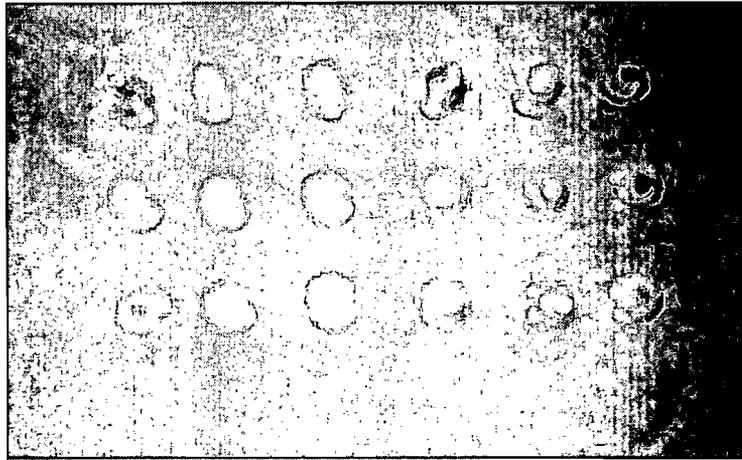


Figura 7.2.- Espigas o pines de acero H13 utilizadas en el presente estudio(Cuerpo sólido)

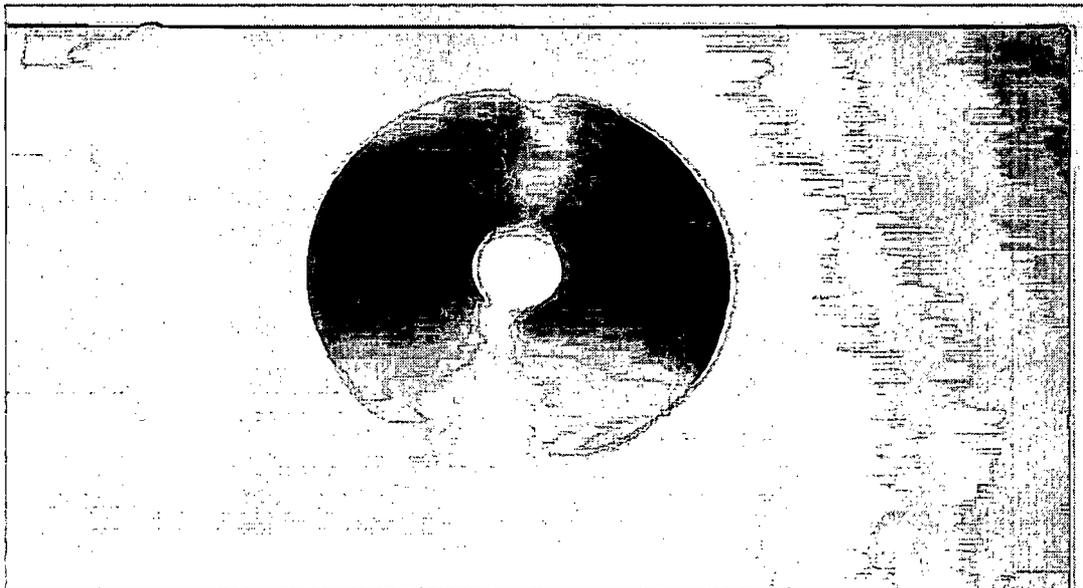


Figura 7.3.- Disco acero M2 utilizado en el presente estudio(Cuerpo contrario)

D) Características geométricas.

Las espigas se maquinaron en torno de control numérico.

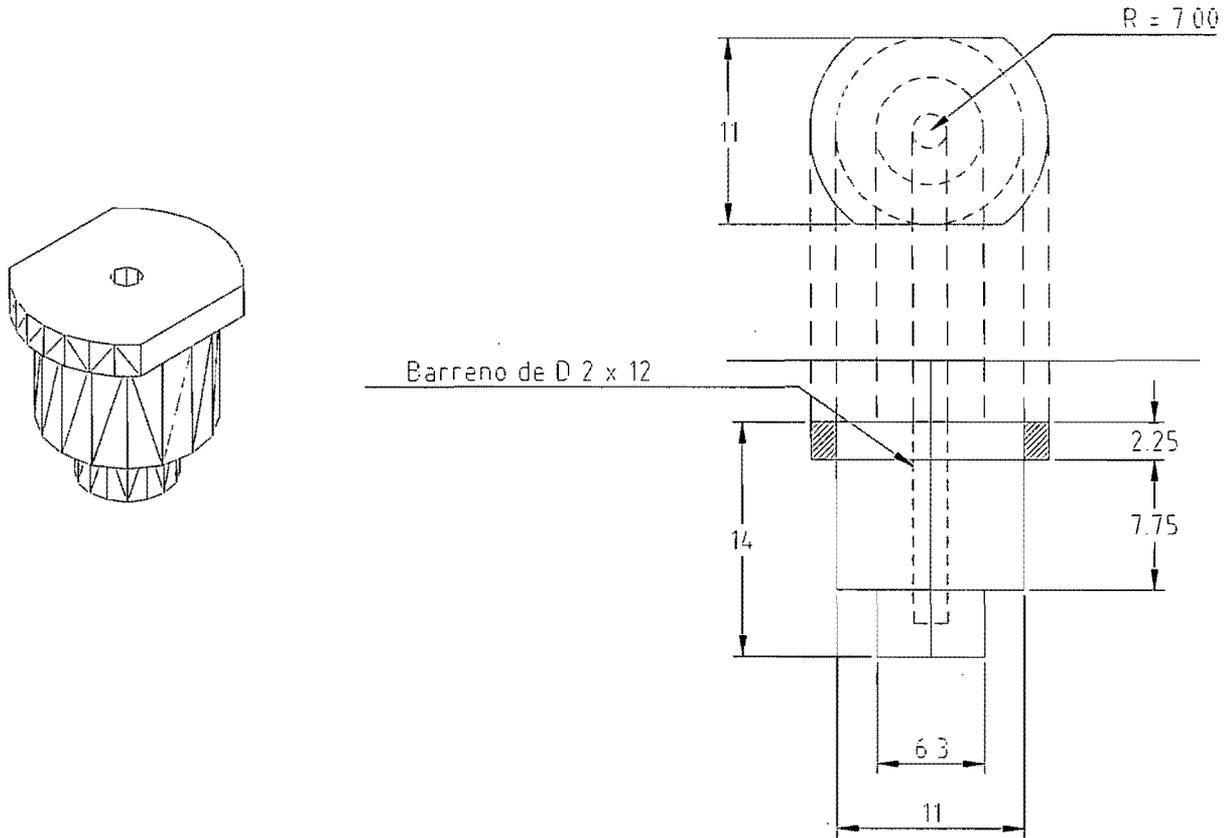


Figura 7.4.- Características geométricas de la espiga utilizada en las pruebas (Cuerpo sólido).

Acotación
mm

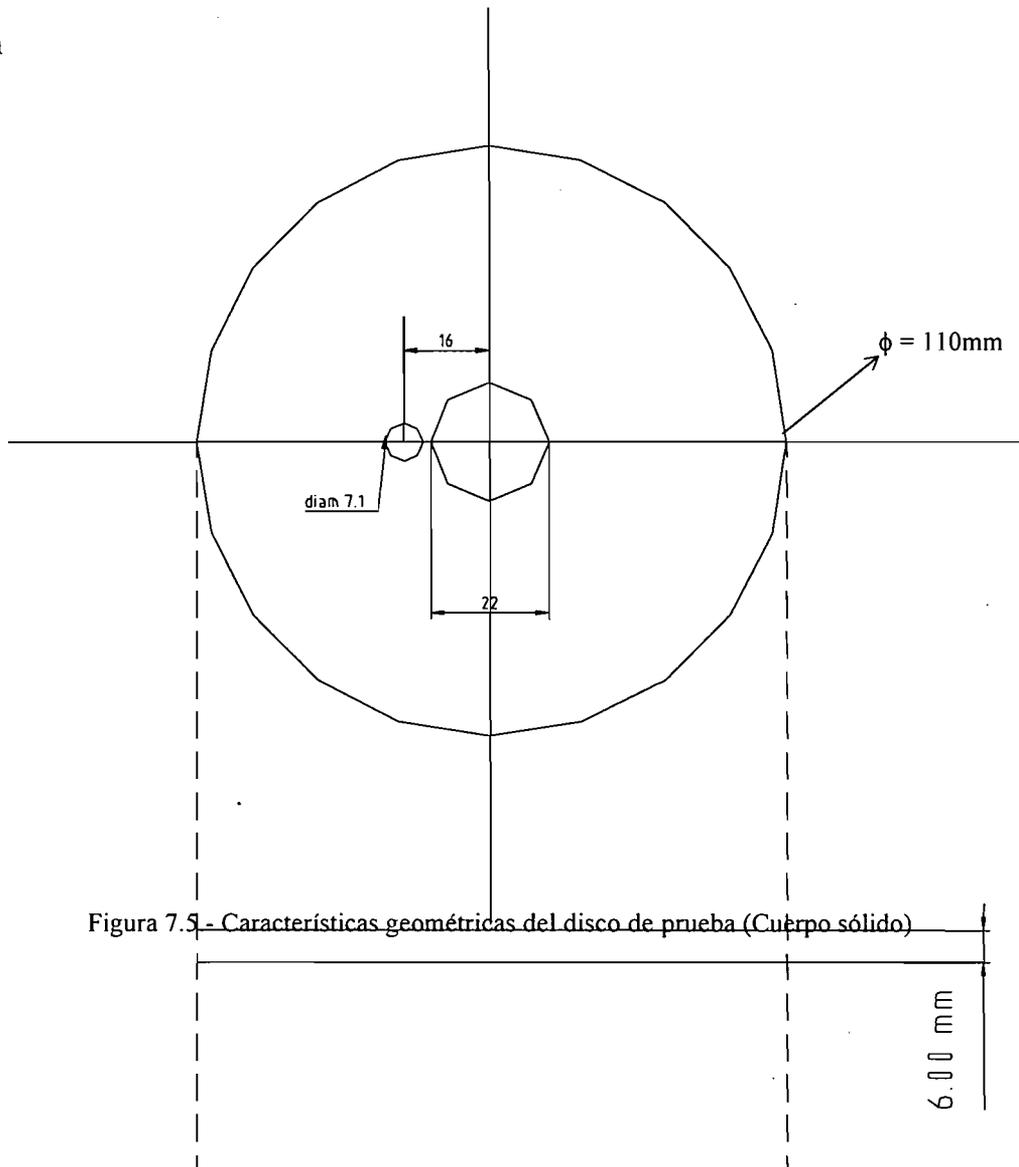


Figura 7.5.- Características geométricas del disco de prueba (Cuerpo sólido)

Figura 7.5.- Características geométricas del disco utilizado en las pruebas (Cuerpo contrario).

E) Composición Química.

H13			
C	0.40	Si	1.00
Mn	0.40	Cr	5.00
Mo	1.20 – 1.40	V	1.00

M2			
C	0.80	Si	0.20
Mn	0.30	Cr	0.40
Mo	5.00	V	6.50

Tabla 7.1.- Composición química de los aceros utilizados en el presente estudio

F) Microestructura.

De acuerdo a las composiciones químicas y los tratamientos térmicos a los que se sometieron los materiales en consideración, como un medio de apoyo confiable se pueden consultar las micrografías que aparecen en las diferentes ediciones de los Metals Handbook.

G) Acondicionamiento del material.

El estudio se concentra en la evaluación del acero H13, con 2 condiciones estructurales, y por lo tanto con propiedades mecánicas diferentes. Se hicieron dos grupos de espigas, el primero se mantuvo con la estructura original deformada, tanto por la laminación de la barra como por el maquinado de las muestras (estado recocido). Al segundo grupo se le realizó un temple y revenido (tabla 7.2) con el fin de obtener una microestructura distinta y de esta forma garantizar un comportamiento mecánico diferente.

TEMPLE				
Pre calentamiento	Austenitización	Tiempo en la temperatura de endurecimiento	Medio de temple	Dureza HRc
815 °C	995 – 1040 °C	15 – 40 min.	Aire	51-52
La razón de pre calentamiento es moderada a partir de esta temperatura				

REVENIDO		
Temperatura	Tiempo en la temperatura de revenido	Dureza HRc
540 °C	2 hrs.	51

Tabla 7.2.- Condiciones del tratamiento térmico realizado al acero H13

Por otra parte para el disco (acero M2) se le realizó el siguiente tratamiento térmico, tabla 7.3:

TEMPLE				
Pre calentamiento	Austenitización	Tiempo en la temperatura de endurecimiento	Medio de temple	Dureza HRc
730 - 845 °C	1190 – 1230 °C	2 – 5 min.	Aire, aceite o sales*	64

*Para una funcionalidad óptima, el disco (material a ser templado) requiere de una máxima planicidad, por lo que se realizó temple prensado.

REVENIDO		
Temperatura	Tiempo en la temperatura de revenido	Dureza HRc
545 °C	2 1 /2 hrs.	61

Tabla 7.3.- Condiciones del tratamiento térmico M2

Posteriormente por las características del estudio se obtuvo la dureza utilizando el equipo ilustrado en la siguiente figura

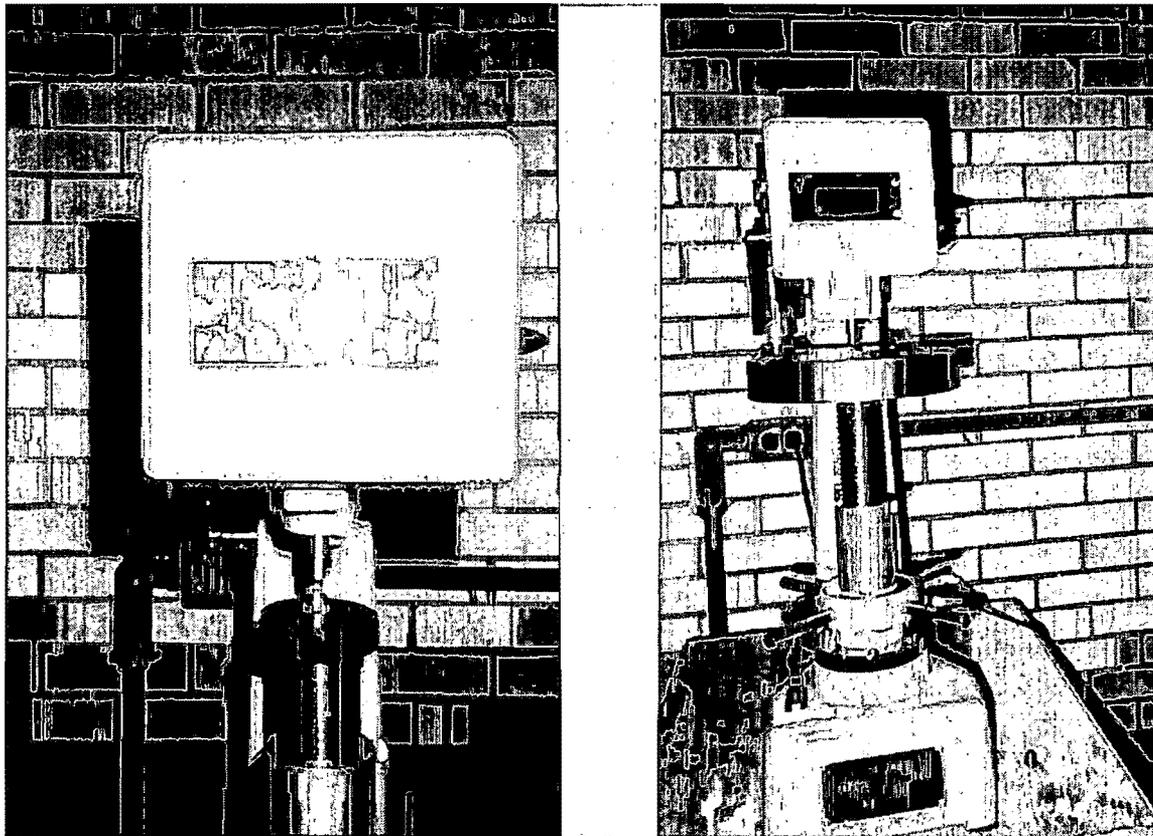


Figura 7.6.- Durómetro

H) Rugosidad.

Una vez realizado el tratamiento térmico en ambos materiales, se les rectificó y posteriormente se acondicionó la superficie con lija 220, 320, 500 y 800 obteniendo las rugosidades correspondientes a las lijas utilizadas.

I) Peso.

Para la medición de peso se utilizó una balanza analítica (figura 7.9), Marca OHAUS, Modelo Galaxy™, con una precisión de 0.0001 de gramo

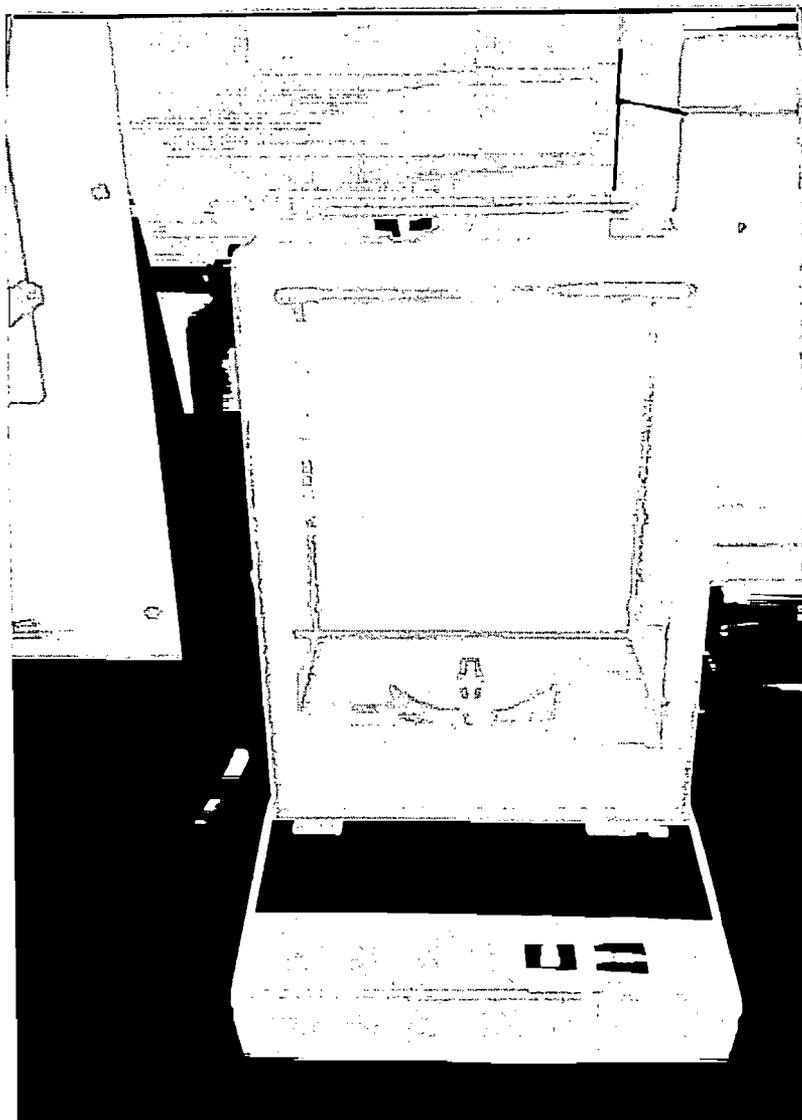


Figura 7.7.- Balanza analítica, marca OHAUS, modelo Galaxy™

J) Ubicación de las probetas.

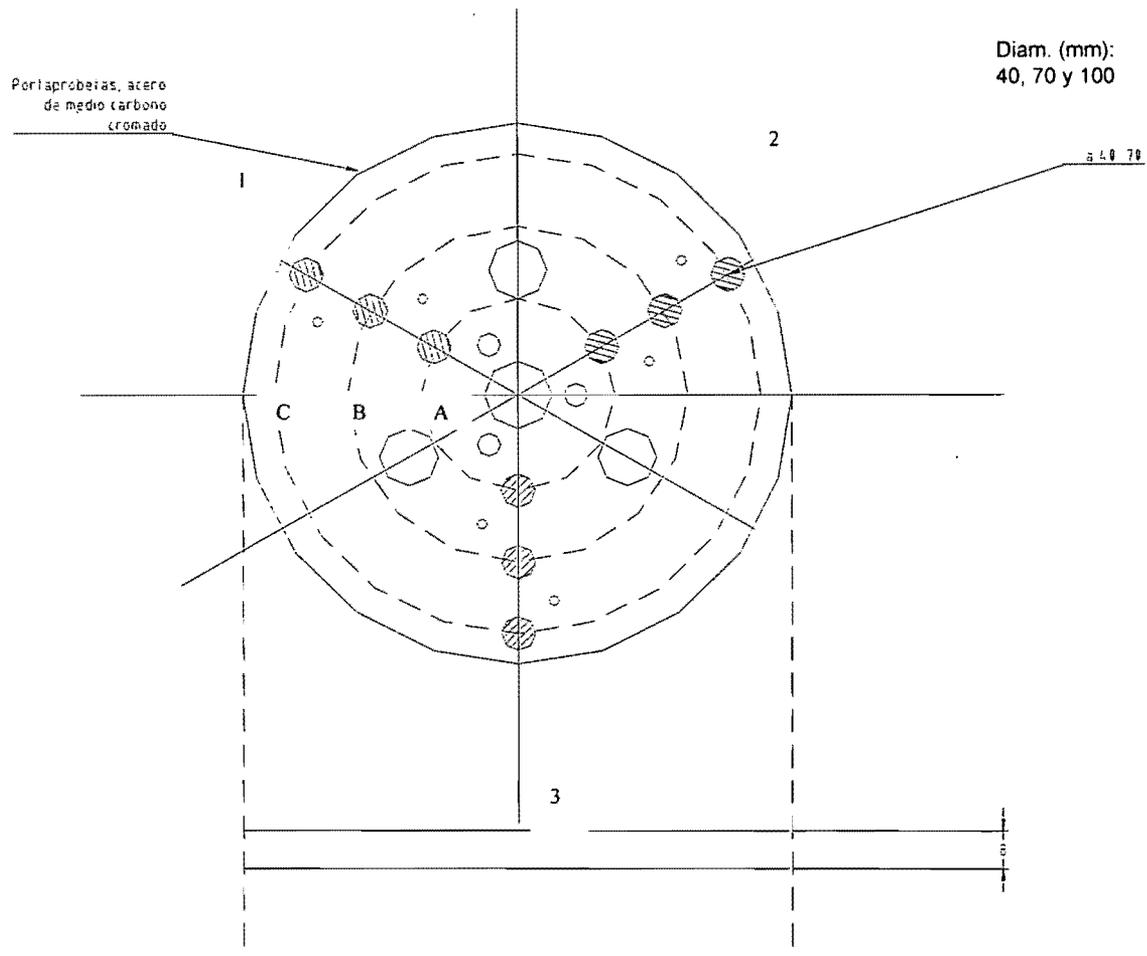


Figura 7.8.- Ubicación de los espigas

Posteriormente se seleccionaron, velocidad, tiempo y las distancias de análisis de tal modo que al obtener los datos y graficar se pudieran analizar de manera continua.

7.1.- Procedimiento.

Considerando que se va a trabajar con ecuación (2.25) del capítulo II, con la única información que se cuenta es con la dureza y hace falta determinar:

- Carga Axial.

La determinación de la carga axial aplicada con el equipo utilizado, se realizó utilizando la siguiente ecuación:

$$C_a = L_a(5) + P_p \quad \dots 7.1$$

donde:

C_a .- Carga axial

L_a .- Carga aplicada

P_p .- Peso del portamuestras

• **Distancia de deslizamiento.**

La distancia de deslizamiento se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$S = (\pi \times d.) (r.p.m.) (t) \quad \dots 7.2$$

donde:

S.- distancia de deslizamiento (m)

r.p.m.- velocidad de giro del disco

d.- diámetro en el que esta ubicada la probeta (m)

t.- tiempo de prueba (seg.)

Y finalmente de acuerdo a la ecuación (2.4) del capítulo II, el desgaste que se obtiene experimentalmente por:

$$W = V_i - V_f$$

donde:

W.- Desgaste.

V_i .- Volumen inicial.

V_f .- Volumen final.



En este caso particular en primera instancia se determinó el desgaste por pérdida de peso y el cambio a pérdida de volumen se realizó utilizando la ecuación (5.3) del capítulo V. (La densidad del material utilizado se determino experimentalmente y tiene un valor de $\rho = 7.29 \text{ g/cm}^3$).

Una vez que se obtuvo el desgaste W, se procedió a la obtención del coeficiente de desgaste k, utilizando la ecuación (2.25) del capítulo II.

Finalmente, la razón de desgaste se obtuvo utilizando la ecuación (2.6), pero considerando únicamente la variación del desgaste respecto al tiempo, es decir:

$$\dot{W} = W / \Delta t \quad \dots 7.3$$

donde.

- W.- razón de desgaste respecto al tiempo (cm³/seg o g/cm³)
- W.- desgaste (cm³ o g³)
- Δt.- Tiempo de prueba.

Una vez que se realizó el planteamiento de las pruebas se procedió a realizarlas.

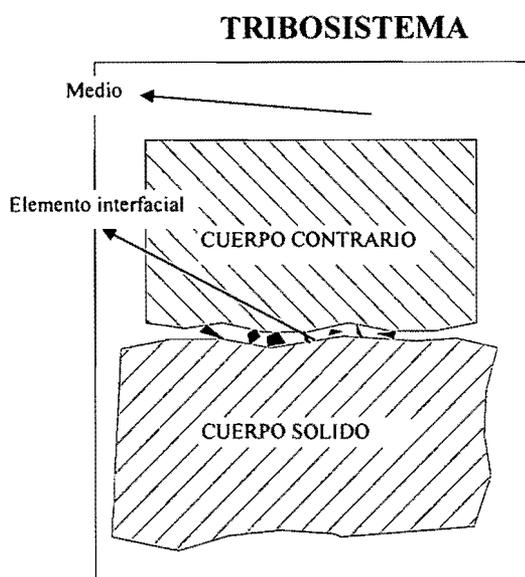
Referencias.

- [1] K - H. Zum Gahr
Microstructure and wear of materials.
Elsevier, 1987.
- [2] T.F.J. Quinn
Physical analysis for tribology.
Cambridge University, 1991.
- [3] Metals Handbook
Properties and selection iron and steel.
Vol. 1, 1972.
- [4] ASM Handbook
Tribology.
Vol. 18, ASM International, 1992.
- [5] J.A.Pask
An Atomistic Approach to the Nature and Properties of Materials
J.A Pask, New York, 1967.
- [6] Selecting Material For Wear Resistance, Guide to Selecting Engineering Materials.
Revista "Advanced Material & Process".
1990.
- [7] Annual book of ASTM standards
"Metals test methods and analytical procedures".
Norma ASTM "Wear and erosion; Metal corrosion", 1993.

CAPÍTULO VIII.

8.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

A.- Tribosistema en consideración:



Características mecánicas

Cuerpo sólido: Acero H13.

Condición 1: Recocido (11 HRc)

Condición 2: Templado y revenido (51 HRc)

Cuerpo contrario: Acero M2.

Condición : Templado y revenido (61 HRc)

Elemento interfacial: No.

Medio: aire.

Figura 8.1.- Representación esquemática del tribosistema en consideración

B.- Mecanismo de desgaste.

La acción de los elementos o la interacción entre ellos puede variar bastante dependiendo el tribosistema en consideración, sin embargo de acuerdo al movimiento (cinemática del sistema) se considera desgaste por deslizamiento, característica que se asume por el equipo utilizado y por las aplicaciones del acero en cuestión. De acuerdo al estado físico del cuerpo contrario, se considera un estudio de desgaste por un sólido, o con ángulo de contacto aparente de 90°. Finalmente basándose en el elemento interfacial, el estudio realizado es para desgaste en seco.

C.- Pruebas realizadas:

Después de una serie de pruebas preliminares a este estudio, para los datos e información de este trabajo se realizaron de 48 pruebas, evaluando un total de 144 probetas, lo que implicó pulido de probetas antes de cada prueba, pesado y limpieza de las probetas antes y después de cada prueba.

D.- Carga aplicada.

$L = 4 \text{ kg.}$

E.- Velocidad .

500 r.p.m.

F.- Tiempos de prueba:

$t_1 = 60 \text{ s.}$

$t_2 = 60 \text{ s.}$

$t_3 = 60 \text{ s.}$

$t_4 = 195 \text{ s.}$

$t_5 = 138 \text{ s}$

$t_6 = 114 \text{ s.}$

G.- Distancias de deslizamiento o puntos de análisis propuestos.

$X_1 = 62.832 \text{ m.}$

$X_2 = 109.95 \text{ m.}$

$X_3 = 157.08 \text{ m.}$

$X_4 = 204.20 \text{ m.}$

$X_5 = 252.89 \text{ m}$

$X_6 = 298.452 \text{ m.}$

F.- Graficación de resultados.

Los valores correspondientes a estos gráficos se encuentran en el anexo 1, Tablas.

8.1.- Resultados.

TABLA 1

PRUEBA 1,2,3
ACERO H13 EN ESTADO RECOCIDO.

PRUEBA 1 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1A	8.7645	8.7644	8.7645	8.7645
2A	8.7756	8.7758	8.7758	8.7756
3A	8.6505	8.6504	8.6504	8.6504

PRUEBA 2 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1B	8.6796	8.6796	8.6795	8.6796
2B	8.8204	8.8205	8.8204	8.8204
3B	8.7334	8.7333	8.7333	8.7333

PRUEBA 3 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1C	8.7554	8.7754	8.7555	8.7554
2C	8.7584	8.7583	8.7583	8.7583
3C	8.7105	8.7104	8.7104	8.7104

PRUEBA 1 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1A	8.7642	8.7642	8.7643	8.7642
2A	8.7754	8.7755	8.7754	8.7754
3A	8.6504	8.6504	8.6503	8.6504

PRUEBA 2 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1B	8.6792	8.6792	8.6793	8.6792
2B	8.8200	8.1999	8.8200	8.8200
3B	8.7330	8.7330	8.7330	8.7330

PRUEBA 3 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1C	8.7549	8.7549	8.7549	8.7549
2C	8.7578	8.7578	8.7578	8.7578
3C	8.7099	8.7099	8.7099	8.7099

TABLA 1

PRUEBA1,2,3

DESGASTE	W PERDIDA DE PESO-(gr)
1A	0.0002
2A	0.0002
3A	0.0001
1B	0.0003
2B	0.0004
3B	0.0003
1C	0.0005
2C	0.0005
3C	0.0005

CARACTERÍSTICAS DE LA PRUEBA

PESO (kg) =	0.5
L (CARGA (kg)) =	4
VELOCIDAD DE PRUEBA (rpm) =	500
TIEMPO DE PRUEBA (min) =	1
S (DISTANCIA DE DESLIZAMIENTO (m)) =	
S1 =	62.832
S2 =	109.956
S3 =	157.08
H (DUREZA (HRc)) =	11
Vickers =	202

W = DESGASTE PROMEDIO (gr)

W1	0.0002
W2	0.0004
W3	0.0005

W = DESGASTE (mm³) (ecuación 5.3)

W1 =	0.0213
W2 =	0.0488
W3 =	0.0686

RAZON DE DESGASTE RESPECTO AL TIEMPO

w1=	2.59E-06
w2=	5.93E-06
w3=	8.33E-06

COEFICIENTE DE DESGASTE (ecuacion 1.2)

K1=	1.72E-05
K2=	2.24E-05
K3=	2.21E-05

Nota.- Donde desgaste promedio W (gr) se obtiene $W1=1A+2A+3A$, $W2=2A+2B+2C$,... y el desgaste por pérdida de volumen (mm³) se obtiene a partir del desgaste promedio, utilizando la ecuación 5.3.

TABLA 2

PRUEBA 4,5,6

ACERO H13 EN ESTADO RECOCIDO.

PRUEBA 4	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	PROBETA	1	2	
1A	8.6888	8.6888	8.6888	8.6888
2A	8.6916	8.6918	8.6916	8.6917
3A	8.5347	8.5346	8.5347	8.5347

PRUEBA 5	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	PROBETA	1	2	
1B	8.6258	8.6258	8.6258	8.6258
2B	8.8195	8.8195	8.8194	8.8195
3B	8.6564	8.6564	8.6564	8.6564

PRUEBA 6	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	PROBETA	1	2	
1C	8.6976	8.6977	8.6977	8.6977
2C	8.6853	8.6854	8.6854	8.6854
3C	8.5581	8.5581	8.5580	8.5581

PRUEBA 4	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	PROBETA	1	2	
1A	8.6873	8.6873	8.6872	8.6873
2A	8.6904	8.6904	8.6904	8.6904
3A	8.5333	8.5333	8.5332	8.5333

PRUEBA 5	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	PROBETA	1	2	
1B	8.6250	8.6250	8.6250	8.6250
2B	8.8188	8.8188	8.8187	8.8188
3B	8.6556	8.6556	8.6555	8.6556

PRUEBA 6	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	PROBETA	1	2	
1C	8.6971	8.6970	8.6970	8.6970
2C	8.6850	8.6849	8.6849	8.6849
3C	8.5573	8.5577	8.5576	8.5575

TABLA 2

PRUEBA 4,5,6

DESGASTE	W PERDIDA DE PESO-(gr)
1A	0.0015
2A	0.0013
3A	0.0014
1B	0.0008
2B	0.0007
3B	0.0008
1C	0.0006
2C	0.0004
3C	0.0005

CARACTERÍSTICAS DE LA PRUEBA

PESO (kg) =	0.5
L (CARGA (kg)) =	4
VELOCIDAD DE PRUEBA (rpm) =	500
TIEMPO DE PRUEBA (min) =	
t1=	3.25
t2=	2.3
t3=	1.9

S (DISTANCIA DE DESLIZAMIENTO (m)) =

S1 =	204.204
S2 =	252.8988
S3 =	298.452

H (DUREZA (HRc)) =	11
Vickers =	202

W = DESGASTE PROMEDIO (gr)

W1	0.0014
W2	0.0008
W3	0.0005

W = DESGASTE (mm³)
(ecuación 5.3)

W1 =	0.1920
W2 =	0.1067
W3 =	0.0732

RAZON DE DESGASTE
RESPECTO AL TIEMPO

w1=	7.18E-06
w2=	5.64E-06
w3=	4.68E-06

COEFICIENTE DE DESGASTE
(ecuación 1.2)

K1=	4.75E-05
K2=	2.13E-05
K3=	1.24E-05

Nota.- Donde desgaste promedio W (gr) se obtiene $W1=1A+2A+3A$, $W2=2A+2B+2C$,... y el desgaste por pérdida de volumen (mm³) se obtiene a partir del desgaste promedio, utilizando la ecuación 5.3.

TABLA 3

PRUEBA 7,8,9

ACERO H13 EN ESTADO RECOCIDO.

PRUEBA 7	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
PROBETA				
1A	8.5590	8.5590	8.5590	8.5590
2A	8.3807	8.3807	8.3808	8.3807
3A	8.5833	8.5833	8.5833	8.5833

PRUEBA 8	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
PROBETA				
1B	8.5718	8.5718	8.5718	8.5718
2B	8.6722	8.6721	8.6721	8.6721
3B	8.4881	8.4881	8.4881	8.4881

PRUEBA 9	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
PROBETA				
1C	8.5675	8.5677	8.5677	8.5676
2C	8.6004	8.6005	8.6005	8.6005
3C	8.3431	8.3430	8.3431	8.3431

PRUEBA 7	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
PROBETA				
1A	8.5588	8.5589	8.5589	8.5589
2A	8.3807	8.3806	8.3807	8.3807
3A	8.5832	8.5832	8.5832	8.5832

PRUEBA 8	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
PROBETA				
1B	8.5716	8.5716	8.5716	8.5716
2B	8.6718	8.6719	8.6719	8.6719
3B	8.4878	8.4878	8.4878	8.4878

PRUEBA 9	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
PROBETA				
1C	8.5672	8.5672	8.5672	8.5672
2C	8.5999	8.5999	8.5999	8.5999
3C	8.3426	8.3426	8.3426	8.3426

TABLA 3

PRUEBA 7,8,9

DESGASTE	W PERDIDA DE PESO-(gr)
1A	0.0001
2A	0.0001
3A	0.0001
1B	0.0002
2B	0.0003
3B	0.0003
1C	0.0004
2C	0.0006
3C	0.0005

CARACTERÍSTICAS DE LA PRUEBA

PESO (kg) =	0.5
L (CARGA (kg)) =	4
VELOCIDAD DE PRUEBA (rpm) =	500
TIEMPO DE PRUEBA (min) =	1
S (DISTANCIA DE DESLIZAMIENTO (m)) =	
	S1 = 62.832
	S2 = 109.956
	S3 = 157.08
H (DUREZA (HRc)) =	11
Vickers =	202

W = DESGASTE PROMEDIO (gr)

W1	0.0001
W2	0.0003
W3	0.0005

W = DESGASTE (mm³) (ecuación 5.3)

W1 =	0.0137
W2 =	0.0351
W3 =	0.0671

RAZON DE DESGASTE RESPECTO AL TIEMPO

w1=	1.67E-06
w2=	4.26E-06
w3=	8.15E-06

COEFICIENTE DE DESGASTE (ecuacion 1.2)

K1=	1.10E-05
K2=	1.61E-05
K3=	2.16E-05

Nota.- Donde desgaste promedio W (gr) se obtiene $W1=1A+2A+3A$, $W2=2A+2B+2C$,... y el desgaste por pérdida de volumen (mm³) se obtiene a partir del desgaste promedio, utilizando la ecuación 5.3.

TABLA 4

PRUEBA 10,11,12

ACERO H13 EN ESTADO RECOCIDO.

PRUEBA 10	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1A	8.9201	8.9201	8.9201	8.9201
2A	8.8930	8.8931	8.8930	8.8930
3A	8.9337	8.9337	8.9337	8.9337

PRUEBA 11	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1B	8.9087	8.9086	8.9087	8.9087
2B	8.8555	8.8554	8.8555	8.8555
3B	8.7439	8.7440	8.7439	8.7439

PRUEBA 12	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1C	8.7319	8.7319	8.7319	8.7319
2C	8.9285	8.9284	8.9284	8.9284
3C	8.7065	8.7066	8.7065	8.7065

PRUEBA 10	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1A	8.9190	8.9191	8.9191	8.9191
2A	8.8919	8.8919	8.8918	8.8919
3A	8.9325	8.9324	8.9324	8.9324

PRUEBA 11	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1B	8.9079	8.9079	8.9079	8.9079
2B	8.8547	8.8546	8.8546	8.8546
3B	8.7430	8.7430	8.7430	8.7430

PRUEBA 12	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1C	8.7314	8.7313	8.7314	8.7314
2C	8.9278	8.9278	8.9279	8.9278
3C	8.7060	8.7060	8.7059	8.7060

TABLA 4

PRUEBA 10,11,12

DESGASTE	W PERDIDA DE PESO-(gr)
1A	0.0010
2A	0.0012
3A	0.0013
1B	0.0008
2B	0.0008
3B	0.0009
1C	0.0005
2C	0.0006
3C	0.0005

CARACTERÍSTICAS DE LA PRUEBA

PESO (kg) =	0.5
L (CARGA (kg)) =	4
VELOCIDAD DE PRUEBA (rpm) =	500
TIEMPO DE PRUEBA (min) =	
t1=	3.25
t2=	2.3
t3=	1.9

S (DISTANCIA DE DESLIZAMIENTO (m)) =

S1 =	204.204
S2 =	252.8988
S3 =	298.452

H (DUREZA (HRc)) =	11
Vickers =	202

W = DESGASTE PROMEDIO (gr)

W1	0.0012
W2	0.0008
W3	0.0005

W = DESGASTE (mm³)
(ecuación 5.3)

W1 =	0.1585
W2 =	0.1158
W3 =	0.0747

RAZON DE DESGASTE
RESPECTO AL TIEMPO

w1=	5.93E-06
w2=	6.12E-06
w3=	4.78E-06

COEFICIENTE DE DESGASTE
(ecuacion 1.2)

K1=	3.92E-05
K2=	2.31E-05
K3=	1.26E-05

Nota.- Donde desgaste promedio W (gr) se obtiene $W1=1A+2A+3A$, $W2=2A+2B+2C$,... y el desgaste por pérdida de volumen (mm³) se obtiene a partir del desgaste promedio, utilizando la ecuación 5.3.

TABLA 5

PRUEBAS 25,26,27

ACERO H13 EN ESTADO RECOCIDO.

PRUEBA 25	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	PROBETA	1	2	
1A	8.5404	8.5403	8.5403	8.5403
2A	8.5608	8.5607	8.5608	8.5608
3A	8.3684	8.3684	8.3685	8.3684

PRUEBA 26	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	PROBETA	1	2	
1B	8.5346	8.5344	8.5345	8.5345
2B	8.6397	8.6396	8.6397	8.8204
3B	8.4820	8.4821	8.4821	8.4821

PRUEBA 27	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	PROBETA	1	2	
1C	8.5394	8.5395	8.5394	8.5394
2C	8.5986	8.5986	8.5985	8.5986
3C	8.3429	8.3429	8.3429	8.3429

PRUEBA 25	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	PROBETA	1	2	
1A	8.5402	8.5402	8.5401	8.5402
2A	8.5607	8.5607	8.5607	8.5607
3A	8.3683	8.3683	8.3683	8.3683

PRUEBA 26	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	PROBETA	1	2	
1B	8.5342	8.5342	8.5342	8.5342
2B	8.6390	8.6390	8.6390	8.8200
3B	8.4818	8.4818	8.4818	8.4818

PRUEBA 27	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	PROBETA	1	2	
1C	8.5389	8.5389	8.5390	8.5389
2C	8.5982	8.5982	8.5982	8.5982
3C	8.3424	8.3424	8.3424	8.3424

TABLA 5

PRUEBAS 25,26,27

ESGAST	W PERDIDA DE PESO-(gr)
1A	0.0002
2A	0.0001
3A	0.0001
1B	0.0003
2B	0.0004
3B	0.0003
1C	0.0005
2C	0.0004
3C	0.0005

CARACTERÍSTICAS DE LA PRUEBA

PESO (kg) =	0.5
L (CARGA (kg)) =	4
VELOCIDAD DE PRUEBA (rpm) =	500
TIEMPO DE PRUEBA (min) =	1
S (DISTANCIA DE DESLIZAMIENTO (m)) =	
S1 =	62.832
S2 =	109.956
S3 =	157.08
H (DUREZA (HRc)) =	11
Vickers =	202

W = DESGASTE PROMEDIO (gr)

W1	0.0001
W2	0.0003
W3	0.0005

W = DESGASTE (mm³) (ecuación 5.3)

W1 =	0.0168
W2 =	0.0442
W3 =	0.0625

RAZON DE DESGASTE RESPECTO AL TIEMPO

w1=	2.04E-06
w2=	5.37E-06
w3=	7.59E-06

COEFICIENTE DE DESGASTE (ecuacion 1.2)

K1=	1.35E-05
K2=	2.03E-05
K3=	2.01E-05

Nota.- Donde desgaste promedio W (gr) se obtiene $W1=1A+2A+3A$, $W2=2A+2B+2C$,... y el desgaste por pérdida de volumen (mm³) se obtiene a partir del desgaste promedio, utilizando la ecuación 5.3.

TABLA 6

PRUEBAS 28,29,30

ESGAST	W PERDIDA DE PESO-(gr)
1A	0.0012
2A	0.0013
3A	0.0013
1B	0.0009
2B	0.0007
3B	0.0008
1C	0.0007
2C	0.0006
3C	0.0005

CARACTERÍSTICAS DE LA PRUEBA

PESO (kg) =	0.5
L (CARGA (kg)) =	4
VELOCIDAD DE PRUEBA (rpm) =	500
TIEMPO DE PRUEBA (min) =	
t1=	3.25
t2=	2.3
t3=	1.9

S (DISTANCIA DE DESLIZAMIENTO (m)) =

S1 =	204.204
S2 =	252.8988
S3 =	298.452

H (DUREZA (HRc)) =

11

Vickers =

202

W = DESGASTE PROMEDIO (gr)

W1	0.0013
W2	0.0008
W3	0.0006

W = DESGASTE (mm³)
(ecuación 5.3)

W1 =	0.1738
W2 =	0.1113
W3 =	0.0823

RAZON DE DESGASTE
RESPECTO AL TIEMPO

w1=	6.50E-06
w2=	5.88E-06
w3=	5.26E-06

COEFICIENTE DE DESGASTE
(ecuacion 1.2)

K1=	4.30E-05
K2=	2.22E-05
K3=	1.39E-05

Nota.- Donde desgaste promedio W (gr) se obtiene $W1=1A+2A+3A$, $W2=2A+2B+2C$,...
y el desgaste por pérdida de volumen (mm³) se obtiene a partir del desgaste promedio, utilizando la ecuación 5.3.

TABLA 6

PRUEBAS 28,29,30.

ACERO H13 EN ESTADO RECOCIDO.

PRUEBA 28 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1A	8.5142	8.5142	8.5142	8.5142
2A	8.5166	8.5166	8.5166	8.5166
3A	8.3374	8.3374	8.3374	8.3374

PRUEBA 29 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1B	8.5244	8.5244	8.5244	8.5244
2B	8.6265	8.6265	8.6265	8.6265
3B	8.4593	8.4593	8.4593	8.4593

PRUEBA 30 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1C	8.5225	8.5225	8.5225	8.5225
2C	8.5111	8.5111	8.5111	8.5111
3C	8.3317	8.3317	8.3317	8.3317

PRUEBA 28 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1A	8.5130	8.5130	8.5130	8.5130
2A	8.5153	8.5153	8.5153	8.5153
3A	8.3361	8.3361	8.3361	8.3361

PRUEBA 29 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1B	8.5235	8.5235	8.5235	8.5235
2B	8.6257	8.6258	8.6258	8.6258
3B	8.4585	8.4585	8.4585	8.4585

PRUEBA 30 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1C	8.5218	8.5218	8.5218	8.5218
2C	8.5105	8.5105	8.5106	8.5105
3C	8.3311	8.3312	8.3312	8.3312

TABLA 6

PRUEBAS 28,29,30

ESGAST	W PERDIDA DE PESO-(gr)
1A	0.0012
2A	0.0013
3A	0.0013
1B	0.0009
2B	0.0007
3B	0.0008
1C	0.0007
2C	0.0006
3C	0.0005

CARACTERÍSTICAS DE LA PRUEBA

PESO (kg) =	0.5
L (CARGA (kg)) =	4
VELOCIDAD DE PRUEBA (rpm) =	500
TIEMPO DE PRUEBA (min) =	
t1=	3.25
t2=	2.3
t3=	1.9

S (DISTANCIA DE DESLIZAMIENTO (m)) =

S1 =	204.204
S2 =	252.8988
S3 =	298.452

H (DUREZA (HRc)) =

11

Vickers =

202

W = DESGASTE PROMEDIO (gr)

W1	0.0013
W2	0.0008
W3	0.0006

W = DESGASTE (mm³)

(ecuación 5.3)

W1 =	0.1738
W2 =	0.1113
W3 =	0.0823

RAZON DE DESGASTE
RESPECTO AL TIEMPO

w1=	6.50E-06
w2=	5.88E-06
w3=	5.26E-06

COEFICIENTE DE DESGASTE
(ecuacion 1.2)

K1=	4.30E-05
K2=	2.22E-05
K3=	1.39E-05

Nota.- Donde desgaste promedio W (gr) se obtiene $W1=1A+2A+3A$, $W2=2A+2B+2C$,...
y el desgaste por pérdida de volumen (mm³) se obtiene a partir del desgaste
promedio, utilizando la ecuación 5.3.

TABLA 7

PRUEBAS 31,32,33

ACERO H13 EN ESTADO RECOCIDO.

PRUEBA 31	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	PROBETA	1	2	
	1A	8.5390	8.5390	8.5390
	2A	8.5580	8.5580	8.5580
	3A	8.3680	8.3680	8.3680

PRUEBA 32	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	PROBETA	1	2	
	1B	8.5353	8.5353	8.5353
	2B	8.6389	8.6389	8.6389
	3B	8.4824	8.4824	8.4824

PRUEBA 33	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	PROBETA	1	2	
	1C	8.5390	8.5390	8.5390
	2C	8.5981	8.5981	8.5981
	3C	8.3425	8.3425	8.3425

PRUEBA 31	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	PROBETA	1	2	
	1A	8.5390	8.5387	8.5388
	2A	8.5578	8.5577	8.5578
	3A	8.3679	8.3679	8.3679

PRUEBA 32	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	PROBETA	1	2	
	1B	8.5350	8.5350	8.5350
	2B	8.6387	8.6387	8.6387
	3B	8.4820	8.4820	8.4820

PRUEBA 33	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	PROBETA	1	2	
	1C	8.5386	8.5385	8.5386
	2C	8.5975	8.5975	8.5975
	3C	8.3421	8.3420	8.3420

TABLA 7

PRUEBAS 31,32,33

ESGAST	W
	PERDIDA DE PESO-(gr)
1A	0.0002
2A	0.0002
3A	0.0001
1B	0.0003
2B	0.0002
3B	0.0004
1C	0.0004
2C	0.0006
3C	0.0005

CARACTERÍSTICAS DE LA PRUEBA

PESO (kg) =	0.5
L (CARGA (kg)) =	4
VELOCIDAD DE PRUEBA (rpm) =	500
TIEMPO DE PRUEBA (min) =	1
S (DISTANCIA DE DESLIZAMIENTO (m)) =	
S1 =	62.832
S2 =	109.956
S3 =	157.08
H (DUREZA (HRc)) =	11
Vickers =	202

W = DESGASTE PROMEDIO (gr)

W1	0.0002
W2	0.0003
W3	0.0005

W = DESGASTE (mm³) (ecuación 5.3)

W1 =	0.0244
W2 =	0.0412
W3 =	0.0686

RAZON DE DESGASTE RESPECTO AL TIEMPO

w1=	2.96E-06
w2=	5.00E-06
w3=	8.33E-06

COEFICIENTE DE DESGASTE (ecuacion 1.2)

K1=	1.96E-05
K2=	1.89E-05
K3=	2.21E-05

Nota.- Donde desgaste promedio W (gr) se obtiene $W1=1A+2A+3A$, $W2=2A+2B+2C$,...
y el desgaste por pérdida de volumen (mm³) se obtiene a partir del desgaste promedio, utilizando la ecuación 5.3.

TABLA 8

PRUEBAS 34,35,36

ACERO H13 EN ESTADO RECOCIDO.

PRUEBA 34	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	PROBETA	1	2	
1A	8.5128	8.5128	8.5128	8.5128
2A	8.5140	8.5140	8.5140	8.5140
3A	8.3359	8.3359	8.3359	8.3359

PRUEBA 35	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	PROBETA	1	2	
1B	8.5233	8.5233	8.5233	8.5233
2B	8.6259	8.6259	8.6259	8.6259
3B	8.4580	8.4580	8.4580	8.4580

PRUEBA 36	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	PROBETA	1	2	
1C	8.5215	8.5215	8.5215	8.5215
2C	8.5100	8.5100	8.5100	8.5100
3C	8.3300	8.3300	8.3300	8.3300

PRUEBA 34	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	PROBETA	1	2	
1A	8.5116	8.5115	8.5116	8.5116
2A	8.5126	8.5126	8.5126	8.5126
3A	8.3348	8.3348	8.3348	8.3348

PRUEBA 35	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	PROBETA	1	2	
1B	8.5225	8.5225	8.5225	8.5225
2B	8.6252	8.6252	8.6252	8.6252
3B	8.4571	8.4571	8.4571	8.4571

PRUEBA 36	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	PROBETA	1	2	
1C	8.5209	8.5209	8.5208	8.5209
2C	8.5093	8.5094	8.5094	8.5094
3C	8.3294	8.3294	8.3293	8.3294

TABLA 8

PRUEBAS 34,35,36

DESGASTE	W PERDIDA DE PESO-(gr)
1A	0.0012
2A	0.0014
3A	0.0011
1B	0.0008
2B	0.0007
3B	0.0009
1C	0.0006
2C	0.0006
3C	0.0006

CARACTERÍSTICAS DE LA PRUEBA

PESO (kg) = 0.5

L (CARGA (kg)) = 4

VELOCIDAD DE PRUEBA (rpm) = 500

TIEMPO DE PRUEBA (min) =

t1= 3.25

t2= 2.3

t3= 1.9

S (DISTANCIA DE DESLIZAMIENTO (m)) =

S1 = 204.204

S2 = 252.8988

S3 = 298.452

H (DUREZA (HRc)) = 11

Vickers = 202

W = DESGASTE PROMEDIO (gr)

W1	0.0012
W2	0.0008
W3	0.0006

W = DESGASTE (mm³)
(ecuación 5.3)

W1 =	0.1707
W2 =	0.1097
W3 =	0.0869

RAZON DE DESGASTE
RESPECTO AL TIEMPO

w1=	6.38E-06
w2=	5.80E-06
w3=	5.56E-06

COEFICIENTE DE DESGASTE
(ecuacion 1.2)

K1=	4.22E-05
K2=	2.19E-05
K3=	1.47E-05

Nota.- Donde desgaste promedio W (gr) se obtiene $W1=1A+2A+3A$, $W2=2A+2B+2C$,... y el desgaste por pérdida de volumen (mm³) se obtiene a partir del desgaste promedio, utilizando la ecuación 5.3.

TABLA 9

PRUEBA13,14,15

ACERO H13 EN ESTADO TEMPLADO-REVENIDO

PRUEBA 13 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1A	8.7914	8.7915	8.7914	8.7914
2A	8.9272	8.9272	8.9273	8.9272
3A	8.7560	8.7559	8.7559	8.7559

PRUEBA 14 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1B	8.8168	8.8168	8.8168	8.8168
2B	8.8769	8.8769	8.8768	8.8769
3B	8.8328	8.8328	8.8329	8.8328

PRUEBA 15 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1C	8.8303	8.8302	8.8302	8.8302
2C	8.5633	8.5633	8.5633	8.5633
3C	8.5523	8.5523	8.5523	8.5523

PRUEBA 13 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1A	8.7913	8.7913	8.7914	8.7913
2A	8.9271	8.9271	8.9271	8.9271
3A	8.7557	8.7558	8.7558	8.7558

PRUEBA 14 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1B	8.8167	8.8167	8.8167	8.8167
2B	8.8769	8.8769	8.8769	8.8769
3B	8.8327	8.8327	8.8327	8.8327

PRUEBA 15 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1C	8.8300	8.8300	8.8299	8.8300
2C	8.5631	8.5631	8.5631	8.5631
3C	8.5521	8.5520	8.5521	8.5521

TABLA 9

PRUEBA13,14,15

DESGASTE	W PERDIDA DE PESO-(gr)
1A	0.0001
2A	0.0001
3A	0.0002
1B	0.0001
2B	0.0000
3B	0.0001
1C	0.0003
2C	0.0002
3C	0.0002

CARACTERÍSTICAS DE LA PRUEBA

PESO (kg) =	0.5
L (CARGA (kg)) =	4
VELOCIDAD DE PRUEBA (rpm) =	500
TIEMPO DE PRUEBA (min) =	1
S (DISTANCIA DE DESLIZAMIENTO (m)) =	
S1 =	62.832
S2 =	109.956
S3 =	157.08
H (DUREZA (HRc)) =	51
Vickers =	528

W = DESGASTE PROMEDIO (gr)

W1	0.0001
W2	0.0001
W3	0.0002

W = DESGASTE (mm³) (ecuación 5.3)

W1 =	0.0183
W2 =	0.0091
W3 =	0.0320

RAZON DE DESGASTE RESPECTO AL TIEMPO

w1=	2.22E-06
w2=	1.11E-06
w3=	3.89E-06

COEFICIENTE DE DESGASTE (ecuacion 1.2)

K1=	3.84E-05
K2=	1.10E-05
K3=	2.69E-05

Nota.- Donde desgaste promedio W (gr) se obtiene $W1=1A+2A+3A$, $W2=2A+2B+2C$,... y el desgaste por pérdida de volumen (mm³) se obtiene a partir del desgaste promedio, utilizando la ecuación 5.3.

TABLA 10

PRUEBA 16,17,18

ACERO H13 EN ESTADO TEMPLADO-REVENIDO

PRUEBA 16	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)	
	PROBETA	1	2		3
	1A	8.7557	8.7557	8.7557	8.7557
	2A	8.8988	8.8988	8.8988	8.8988
	3A	8.7166	8.7166	8.7166	8.7166

PRUEBA 17	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)	
	PROBETA	1	2		3
	1B	8.7975	8.7975	8.7975	8.7975
	2B	8.8665	8.8665	8.8665	8.8665
	3B	8.7972	8.7972	8.7971	8.7972

PRUEBA 18	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)	
	PROBETA	1	2		3
	1C	8.8153	8.8154	8.8152	8.8153
	2C	8.5609	8.5609	8.5608	8.5609
	3C	8.5501	8.5501	8.5501	8.5501

PRUEBA 16	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)	
	PROBETA	1	2		3
	1A	8.7555	8.7555	8.7555	8.7555
	2A	8.8984	8.8984	8.8985	8.8984
	3A	8.7163	8.7163	8.7163	8.7163

PRUEBA 17	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)	
	PROBETA	1	2		3
	1B	8.7969	8.7970	8.7970	8.7970
	2B	8.8660	8.8660	8.8659	8.8660
	3B	8.7966	8.7965	8.7965	8.7965

PRUEBA 18	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)	
	PROBETA	1	2		3
	1C	8.8150	8.8150	8.8149	8.8150
	2C	8.5605	8.5605	8.5607	8.5606
	3C	8.5497	8.5497	8.5496	8.5497

TABLA 10

PRUEBA 16,17,18

DESGASTE	W PERDIDA DE PESO-(gr)
1A	0.0002
2A	0.0004
3A	0.0003
1B	0.0005
2B	0.0005
3B	0.0006
1C	0.0003
2C	0.0003
3C	0.0004

CARACTERÍSTICAS DE LA PRUEBA

PESO (kg) =	0.5
L (CARGA (kg)) =	4
VELOCIDAD DE PRUEBA (rpm) =	500
TIEMPO DE PRUEBA (min) =	
t1=	3.25
t2=	2.3
t3=	1.9

S (DISTANCIA DE DESLIZAMIENTO (m)) =

S1 =	204.204
S2 =	252.8988
S3 =	298.452

H (DUREZA (HRc)) =

Vickers = 51

528

W = DESGASTE PROMEDIO (gr)

W1	0.0003
W2	0.0006
W3	0.0004

W = DESGASTE (mm³)
(ecuación 5.3)

W1 =	0.0396
W2 =	0.0777
W3 =	0.0488

RAZON DE DESGASTE
RESPECTO AL TIEMPO

w1=	1.48E-06
w2=	4.11E-06
w3=	3.12E-06

COEFICIENTE DE DESGASTE
(ecuacion 1.2)

K1=	2.56E-05
K2=	4.06E-05
K3=	2.16E-05

Nota.- Donde desgaste promedio W (gr) se obtiene $W1=1A+2A+3A$, $W2=2A+2B+2C$,... y el desgaste por pérdida de volumen (mm³) se obtiene a partir del desgaste promedio, utilizando la ecuación 5.3.

TABLA 11

PRUEBA 19,20,21

ACERO H13 EN ESTADO TEMPLADO-REVENIDO

PRUEBA 19 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1A	8.7914	8.7915	8.7914	8.7914
2A	8.9272	8.9272	8.9273	8.9272
3A	8.7559	8.7560	8.7559	8.7559

PRUEBA 20 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1B	8.8168	8.8168	8.8168	8.8168
2B	8.8769	8.8769	8.8768	8.8769
3B	8.8323	8.8323	8.8323	8.8323

PRUEBA 21 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1C	8.8303	8.8302	8.8302	8.8302
2C	8.5633	8.5632	8.5633	8.5633
3C	8.5523	8.5523	8.5523	8.5523

PRUEBA 19 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1A	8.7913	8.7913	8.7913	8.7913
2A	8.9271	8.9272	8.9271	8.9271
3A	8.7557	8.7558	8.7558	8.7558

PRUEBA 20 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1B	8.8167	8.8167	8.8167	8.8167
2B	8.8768	8.8767	8.8768	8.8768
3B	8.8319	8.8319	8.8319	8.8319

PRUEBA 21 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1C	8.8301	8.8301	8.8301	8.8301
2C	8.5631	8.5631	8.5631	8.5631
3C	8.5520	8.5522	8.5522	8.5521

TABLA 11

PRUEBA 19,20,21

DESGASTE	W PERDIDA DE PESO-(gr)
1A	0.0001
2A	0.0001
3A	0.0002
1B	0.0001
2B	0.0001
3B	0.0004
1C	0.0001
2C	0.0002
3C	0.0002

CARACTERÍSTICAS DE LA PRUEBA

PESO (kg) =	0.5
L (CARGA (kg)) =	4
VELOCIDAD DE PRUEBA (rpm) =	500
TIEMPO DE PRUEBA (min) =	1
S (DISTANCIA DE DESLIZAMIENTO (m)) =	
S1 =	62.832
S2 =	109.956
S3 =	157.08
H (DUREZA (HRc)) =	51
Vickers =	528

W = DESGASTE PROMEDIO (gr)

W1	0.0001
W2	0.0002
W3	0.0002

W = DESGASTE (mm³)

(ecuación 5.3)

W1 =	0.0183
W2 =	0.0274
W3 =	0.0213

**RAZON DE DESGASTE
RESPECTO AL TIEMPO**

w1=	2.22E-06
w2=	3.33E-06
w3=	2.59E-06

**COEFICIENTE DE DESGASTE
(ecuacion 1.2)**

K1=	3.84E-05
K2=	3.29E-05
K3=	1.79E-05

Nota.- Donde desgaste promedio W (gr) se obtiene $W1=1A+2A+3A$, $W2=2A+2B+2C$,... y el desgaste por pérdida de volumen (mm³) se obtiene a partir del desgaste promedio, utilizando la ecuación 5.3.

TABLA 12

PRUEBA 22,23,24

ACERO H13 EN ESTADO TEMPLADO-REVENIDO

PRUEBA 22	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)	
	PROBETA	1	2		3
	1A	8.7557	8.7556	8.7557	8.7557
	2A	8.8988	8.8988	8.8987	8.8988
	3A	8.7167	8.7166	8.7166	8.7166

PRUEBA 23	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)	
	PROBETA	1	2		3
	1B	8.7937	8.7938	8.7937	8.7937
	2B	8.8665	8.8664	8.8665	8.8665
	3B	8.7972	8.7971	8.7972	8.7972

PRUEBA 24	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)	
	PROBETA	1	2		3
	1C	8.8153	8.8154	8.8153	8.8153
	2C	8.5608	8.5609	8.5609	8.5609
	3C	8.5502	8.5501	8.5501	8.5501

PRUEBA 22	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)	
	PROBETA	1	2		3
	1A	8.7553	8.7554	8.7553	8.7553
	2A	8.8984	8.8984	8.8985	8.8984
	3A	8.7164	8.7164	8.7166	8.7165

PRUEBA 23	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)	
	PROBETA	1	2		3
	1B	8.7931	8.7932	8.7931	8.7931
	2B	8.8660	8.8660	8.8658	8.8659
	3B	8.7967	8.7967	8.7967	8.7967

PRUEBA 24	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)	
	PROBETA	1	2		3
	1C	8.8150	8.8149	8.8150	8.8150
	2C	8.5605	8.5606	8.5605	8.5605
	3C	8.5499	8.5499	8.5498	8.5499

TABLA 12

PRUEBA 22,23,24

DESGASTE	W PERDIDA DE PESO-(gr)
1A	0.0003
2A	0.0003
3A	0.0002
1B	0.0006
2B	0.0005
3B	0.0005
1C	0.0004
2C	0.0003
3C	0.0003

CARACTERÍSTICAS DE LA PRUEBA

PESO (kg) =	0.5
L (CARGA (kg)) =	4
VELOCIDAD DE PRUEBA (rpm) =	500
TIEMPO DE PRUEBA (min) =	
t1=	3.25
t2=	2.3
t3=	1.9

S (DISTANCIA DE DESLIZAMIENTO (m)) =

S1 =	204.204
S2 =	252.8988
S3 =	298.452

H (DUREZA (HRc)) =	51
Vickers =	528

W = DESGASTE PROMEDIO (gr)

W1	0.0003
W2	0.0005
W3	0.0003

W = DESGASTE (mm³) (ecuación 5.3)

W1 =	0.0381
W2 =	0.0732
W3 =	0.0442

RAZON DE DESGASTE RESPECTO AL TIEMPO

w1=	1.42E-06
w2=	3.86E-06
w3=	2.83E-06

COEFICIENTE DE DESGASTE (ecuacion 1.2)

K1=	2.46E-05
K2=	3.82E-05
K3=	1.95E-05

Nota.- Donde desgaste promedio W (gr) se obtiene $W1=1A+2A+3A$, $W2=2A+2B+2C$,... y el desgaste por pérdida de volumen (mm³) se obtiene a partir del desgaste promedio, utilizando la ecuación 5.3.

TABLA 13

PRUEBAS 37,38,39

ACERO H13 EN ESTADO TEMPLADO-REVENIDO

PRUEBA 37 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1A	8.6661	8.6660	8.6660	8.6660
2A	8.8005	8.8006	8.8006	8.8006
3A	8.6625	8.6625	8.6624	8.6625

PRUEBA 38 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1B	8.7087	8.7085	8.7086	8.7086
2B	8.7607	8.7605	8.7605	8.7606
3B	8.6831	8.6829	8.6829	8.6830

PRUEBA 39 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1C	8.7293	8.7291	8.7291	8.7292
2C	8.5178	8.5178	8.5176	8.5177
3C	8.2150	8.2150	8.2150	8.2150

PRUEBA 37 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1A	8.6660	8.6660	8.6659	8.6660
2A	8.8005	8.8005	8.8004	8.8005
3A	8.6624	8.6624	8.6623	8.6624

PRUEBA 38 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1B	8.7084	8.7085	8.7085	8.7085
2B	8.7604	8.7604	8.7605	8.7604
3B	8.6828	8.6829	8.6829	8.6829

PRUEBA 39 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1C	8.7290	8.7290	8.7290	8.7290
2C	8.5175	8.5175	8.5175	8.5175
3C	8.2149	8.2149	8.2150	8.2149

TABLA 13

PRUEBAS 37,38,39

DESGASTE	W PERDIDA DE PESO-(gr)
1A	0.0001
2A	0.0001
3A	0.0001
1B	0.0001
2B	0.0001
3B	0.0001
1C	0.0002
2C	0.0002
3C	0.0001

W = DESGASTE PROMEDIO (gr)

W1	0.0001
W2	0.0001
W3	0.0002

RAZON DE DESGASTE
RESPECTO AL TIEMPO

w1=	1.48E-06
w2=	2.04E-06
w3=	2.59E-06

CARACTERÍSTICAS DE LA PRUEBA

PESO (kg) =	0.5
L (CARGA (kg)) =	4
VELOCIDAD DE PRUEBA (rpm) =	500
TIEMPO DE PRUEBA (min) =	1
S (DISTANCIA DE DESLIZAMIENTO (m)) =	
	S1 = 62.832
	S2 = 109.956
	S3 = 157.08
H (DUREZA (HRc)) =	51
Vickers =	528

W = DESGASTE (mm³)
(ecuación 5.3)

W1 =	0.0122
W2 =	0.0168
W3 =	0.0213

COEFICIENTE DE DESGASTE
(ecuacion 1.2)

K1=	2.56E-05
K2=	2.01E-05
K3=	1.79E-05

Nota.- Donde desgaste promedio W (gr) se obtiene $W1=1A+2A+3A$, $W2=2A+2B+2C$,... y el desgaste por pérdida de volumen (mm³) se obtiene a partir del desgaste promedio, utilizando la ecuación 5.3.

TABLA 14

PRUEBAS 40,41,42

ACERO H13 EN ESTADO TEMPLADO-REVENIDO

PRUEBA 43	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
PROBETA				
1A	8.6442	8.6443	8.6443	8.6443
2A	8.7879	8.7878	8.7878	8.7878
3A	8.6089	8.6090	8.6089	8.6089

PRUEBA 44	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
PROBETA				
1B	8.6932	8.6933	8.6933	8.6933
2B	8.7498	8.7498	8.7498	8.7498
3B	8.6818	8.6819	8.6817	8.6818

PRUEBA 45	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
PROBETA				
1C	8.6960	8.6959	8.6959	8.6959
2C	8.5110	8.5108	8.5108	8.5109
3C	8.2098	8.2096	8.2097	8.2097

PRUEBA 43	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
PROBETA				
1A	8.6438	8.6438	8.6438	8.6438
2A	8.7875	8.7875	8.7875	8.7875
3A	8.6088	8.6088	8.6087	8.6088

PRUEBA 44	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
PROBETA				
1B	8.6925	8.6925	8.6926	8.6925
2B	8.7491	8.7491	8.7491	8.7491
3B	8.6812	8.6812	8.6812	8.6812

PRUEBA 45	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
PROBETA				
1C	8.6955	8.6955	8.6956	8.6955
2C	8.5105	8.5105	8.5105	8.5105
3C	8.2092	8.2095	8.2095	8.2094

TABLA 14

PRUEBAS 40,41,42

DESGASTE	W PERDIDA DE PESO-(gr)
1A	0.0005
2A	0.0003
3A	0.0002
1B	0.0007
2B	0.0007
3B	0.0006
1C	0.0004
2C	0.0004
3C	0.0003

CARACTERÍSTICAS DE LA PRUEBA

PESO (kg) =		0.5	
L (CARGA (kg)) =		4	
VELOCIDAD DE PRUEBA (rpm) =		500	
TIEMPO DE PRUEBA (min) =			
	t1=	3.25	
	t2=	2.3	
	t3=	1.9	
	t1=	3.25	(195 seg)
	t2=	2.3	(138 seg)
	t3=	1.9	(114 seg)
			204.204
		S2 =	252.8988
		S3 =	298.452
H (DUREZA (HRc)) =			51
Vickers =			528

W = DESGASTE PROMEDIO (gr)

W1	0.0003
W2	0.0007
W3	0.0004

RAZON DE DESGASTE
RESPECTO AL TIEMPO

w1=	1.65E-06
w2=	4.91E-06
w3=	3.12E-06

W = DESGASTE (mm³)
(ecuación 5.3)

W1 =	0.0442
W2 =	0.0930
W3 =	0.0488

COEFICIENTE DE DESGASTE
(ecuacion 1.2)

K1=	2.86E-05
K2=	4.85E-05
K3=	2.16E-05

Nota.- Donde desgaste promedio W (gr) se obtiene $W1=1A+2A+3A$, $W2=2A+2B+2C$,... y el desgaste por pérdida de volumen (mm³) se obtiene a partir del desgaste promedio, utilizando la ecuación 5.3.

TABLA 15

PRUEBAS 43,44,45

ACERO H13 EN ESTADO TEMPLADO-REVENIDO

PRUEBA 40 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1A	8.6657	8.6653	8.6657	8.6656
2A	8.8002	8.8002	8.8002	8.8002
3A	8.6623	8.6623	8.6623	8.6623

PRUEBA 41 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1B	8.6991	8.6990	8.6990	8.6990
2B	8.7604	8.7604	8.7604	8.7604
3B	8.6826	8.6826	8.6826	8.6826

PRUEBA 42 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1C	8.7280	8.7280	8.7280	8.7280
2C	8.5173	8.5173	8.5173	8.5173
3C	8.2148	8.2148	8.2148	8.2148

PRUEBA 40 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1A	8.6654	8.6654	8.6655	8.6654
2A	8.8002	8.8003	8.8002	8.8002
3A	8.6622	8.6622	8.6621	8.6622

PRUEBA 41 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1B	8.6990	8.6988	8.6990	8.6989
2B	8.7603	8.7602	8.7603	8.7603
3B	8.6824	8.6825	8.6825	8.6825

PRUEBA 42 PROBETA	PESO ANTES DE DESGASTARSE (gr)			PESO PROMEDIO (gr)
	1	2	3	
1C	8.7278	8.7278	8.7279	8.7278
2C	8.5172	8.5171	8.5171	8.5171
3C	8.2146	8.2146	8.2146	8.2146

TABLA 15

PRUEBAS 43,44,45

DESGASTE	W PERDIDA DE PESO-(gr)
1A	0.0001
2A	0.0000
3A	0.0001
1B	0.0001
2B	0.0001
3B	0.0001
1C	0.0002
2C	0.0002
3C	0.0002

CARACTERÍSTICAS DE LA PRUEBA

PESO (kg) = 0.5
 L (CARGA (kg)) = 4
 VELOCIDAD DE PRUEBA (rpm) = 500
 TIEMPO DE PRUEBA (min) = 1
 S (DISTANCIA DE DESLIZAMIENTO (m)) =

S1 = 62.832
 S2 = 109.956
 S3 = 157.08

H (DUREZA (HRc)) = 51
 Vickers = 528

W = DESGASTE PROMEDIO (gr)

W1	0.0001
W2	0.0001
W3	0.0002

W = DESGASTE (mm³) (ecuación 5.3)

W1 =	0.0107
W2 =	0.0168
W3 =	0.0244

RAZON DE DESGASTE RESPECTO AL TIEMPO

w1=	1.30E-06
w2=	2.04E-06
w3=	2.96E-06

COEFICIENTE DE DESGASTE (ecuacion 1.2)

K1=	2.24E-05
K2=	2.01E-05
K3=	2.05E-05

Nota.- Donde desgaste promedio W (gr) se obtiene $W1=1A+2A+3A$, $W2=2A+2B+2C$,...
 y el desgaste por pérdida de volumen (mm³) se obtiene a partir del desgaste
 promedio, utilizando la ecuación 5.3.

TABLA 16

PRUEBAS 46,47,48

DESGASTE	W PERDIDA DE PESO-(gr)
1A	0.0002
2A	0.0002
3A	0.0002
1B	0.0006
2B	0.0005
3B	0.0007
1C	0.0004
2C	0.0003
3C	0.0004

CARACTERÍSTICAS DE LA PRUEBA

PESO (kg) =	0.5
L (CARGA (kg)) =	4
VELOCIDAD DE PRUEBA (rpm) =	500
TIEMPO DE PRUEBA (min) =	
	t1= 3.25
	t2= 2.3
	t3= 1.9

S (DISTANCIA DE DESLIZAMIENTO (m)) =

S1 =	204.204
S2 =	252.8988
S3 =	298.452

H (DUREZA (HRc)) =	51
Vickers =	528

W = DESGASTE PROMEDIO (gr)

W1	0.0002
W2	0.0006
W3	0.0004

W = DESGASTE (mm³)
(ecuación 5.3)

W1 =	0.0320
W2 =	0.0838
W3 =	0.0488

RAZON DE DESGASTE
RESPECTO AL TIEMPO

w1=	1.20E-06
w2=	4.43E-06
w3=	3.12E-06

COEFICIENTE DE DESGASTE
(ecuacion 1.2)

K1=	2.07E-05
K2=	4.38E-05
K3=	2.16E-05

Nota.- Donde desgaste promedio W (gr) se obtiene $W1=1A+2A+3A$, $W2=2A+2B+2C$,... y el desgaste por pérdida de volumen (mm³) se obtiene a partir del desgaste promedio, utilizando la ecuación 5.3.

TABLA 16

PRUEBAS 46,47,48

DESGASTE	W PERDIDA DE PESO-(gr)
1A	0.0002
2A	0.0002
3A	0.0002
1B	0.0006
2B	0.0005
3B	0.0007
1C	0.0004
2C	0.0003
3C	0.0004

CARACTERÍSTICAS DE LA PRUEBA

PESO (kg) =	0.5
L (CARGA (kg)) =	4
VELOCIDAD DE PRUEBA (rpm) =	500
TIEMPO DE PRUEBA (min) =	
t1=	3.25
t2=	2.3
t3=	1.9

S (DISTANCIA DE DESLIZAMIENTO (m)) =

S1 =	204.204
S2 =	252.8988
S3 =	298.452

H (DUREZA (HRc)) =

51

Vickers =

528

W = DESGASTE PROMEDIO (gr)

W1	0.0002
W2	0.0006
W3	0.0004

W = DESGASTE (mm³)
(ecuación 5.3)

W1 =	0.0320
W2 =	0.0838
W3 =	0.0488

RAZON DE DESGASTE
RESPECTO AL TIEMPO

w1=	1.20E-06
w2=	4.43E-06
w3=	3.12E-06

COEFICIENTE DE DESGASTE
(ecuacion 1.2)

K1=	2.07E-05
K2=	4.38E-05
K3=	2.16E-05

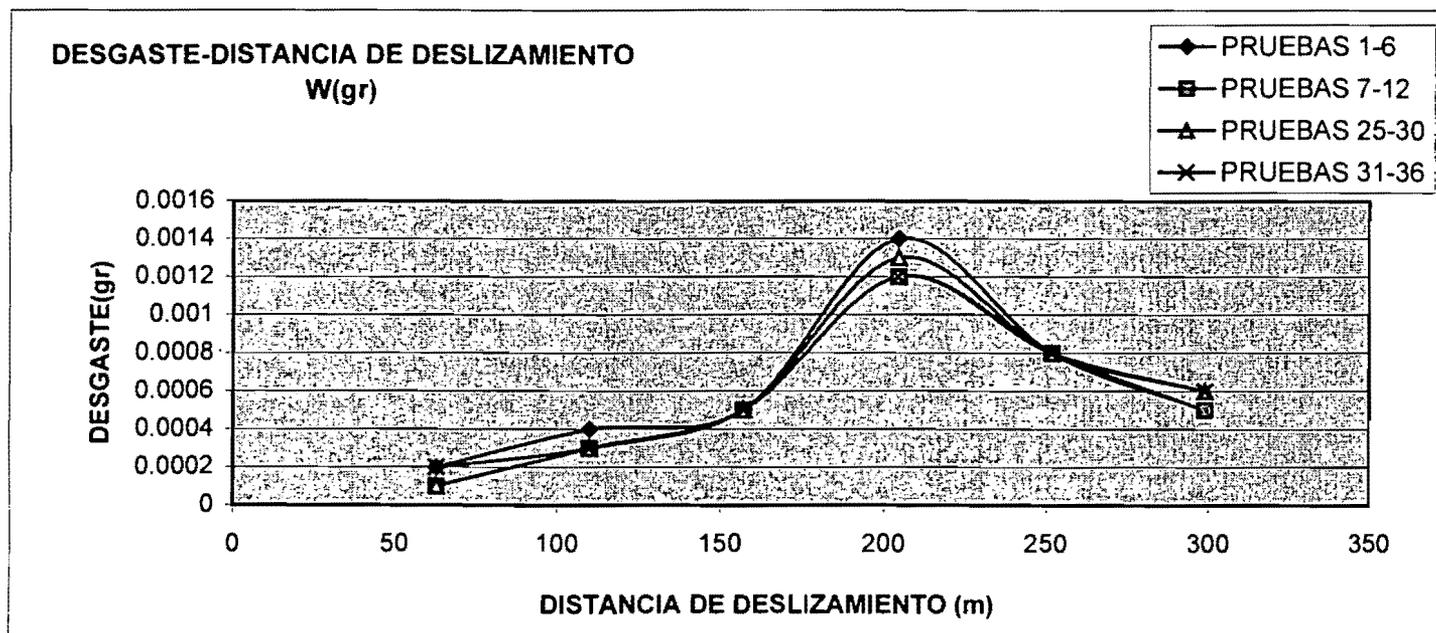
Nota.- Donde desgaste promedio W (gr) se obtiene $W1=1A+2A+3A$, $W2=2A+2B+2C$,... y el desgaste por pérdida de volumen (mm³) se obtiene a partir del desgaste promedio, utilizando la ecuación 5.3.

W-S

GRAFICO 1

ACERO H13 EN ESTADO RECOCIDO.

	Distancia de deslizamiento (m)	Desgaste W (gr)			
		PRUEBAS 1-6	PRUEBAS 7-12	PRUEBAS 25-30	PRUEBAS 31-36
1	62.832	0.0002	0.0001	0.0001	0.0002
2	109.956	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003
3	157.08	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
4	204.38	0.0014	0.0012	0.0013	0.0012
5	251.68	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008
6	298.98	0.0005	0.0005	0.0006	0.0006

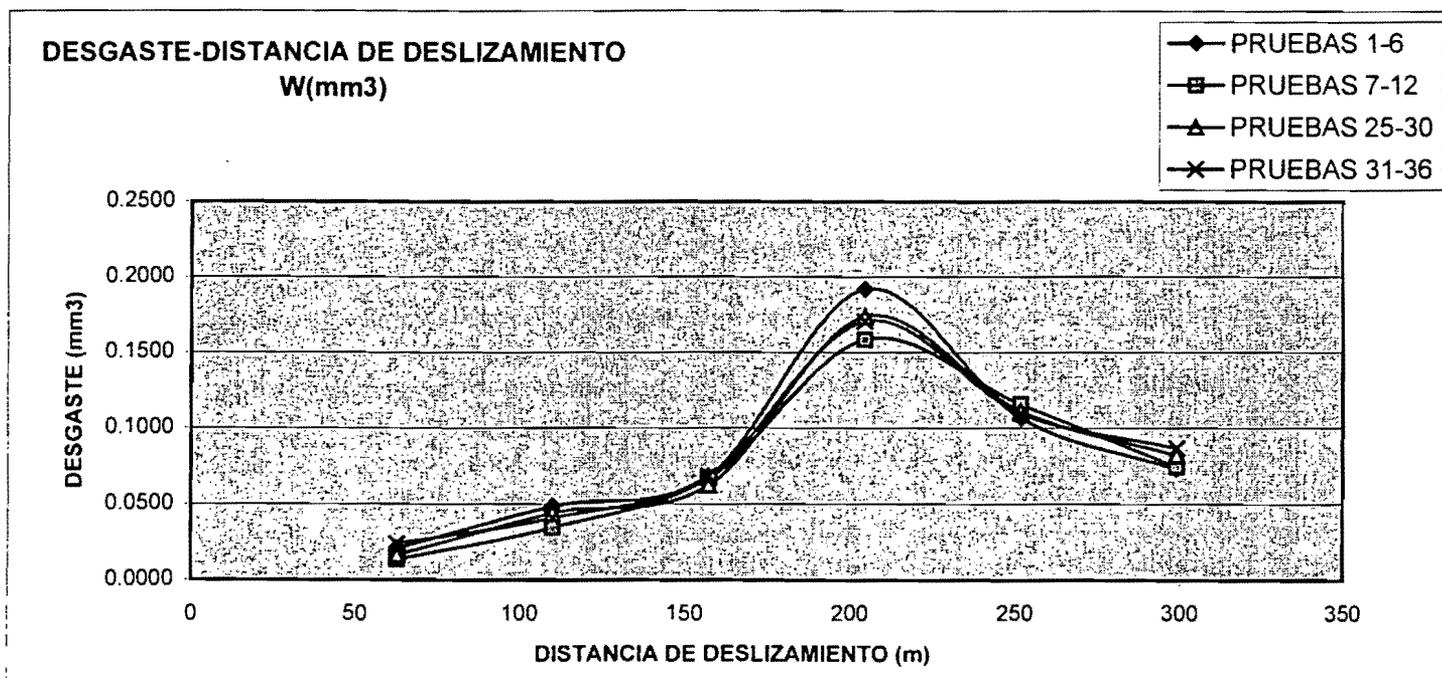


W-S

GRAFICO 2

ACERO H13 EN ESTADO RECOCIDO.

	Distancia de deslizamiento (m)	Desgaste W (mm ³)			
		PRUEBAS 1-6	PRUEBAS 7-12	PRUEBAS 25-30	PRUEBAS 31-36
1	62.832	0.0213	0.0137	0.0168	0.0244
2	109.956	0.0488	0.0351	0.0442	0.0412
3	157.08	0.0686	0.0671	0.0625	0.0686
4	204.38	0.1920	0.1585	0.1738	0.1707
5	251.68	0.1067	0.1158	0.1113	0.1097
6	298.98	0.0732	0.0747	0.0823	0.0869



W-S

GRAFICO 3

TENDENCIA DEL COMPORTAMIENTO EN DESGASTE DE UN ACERO H13 EN ESTADO RECOCIDO

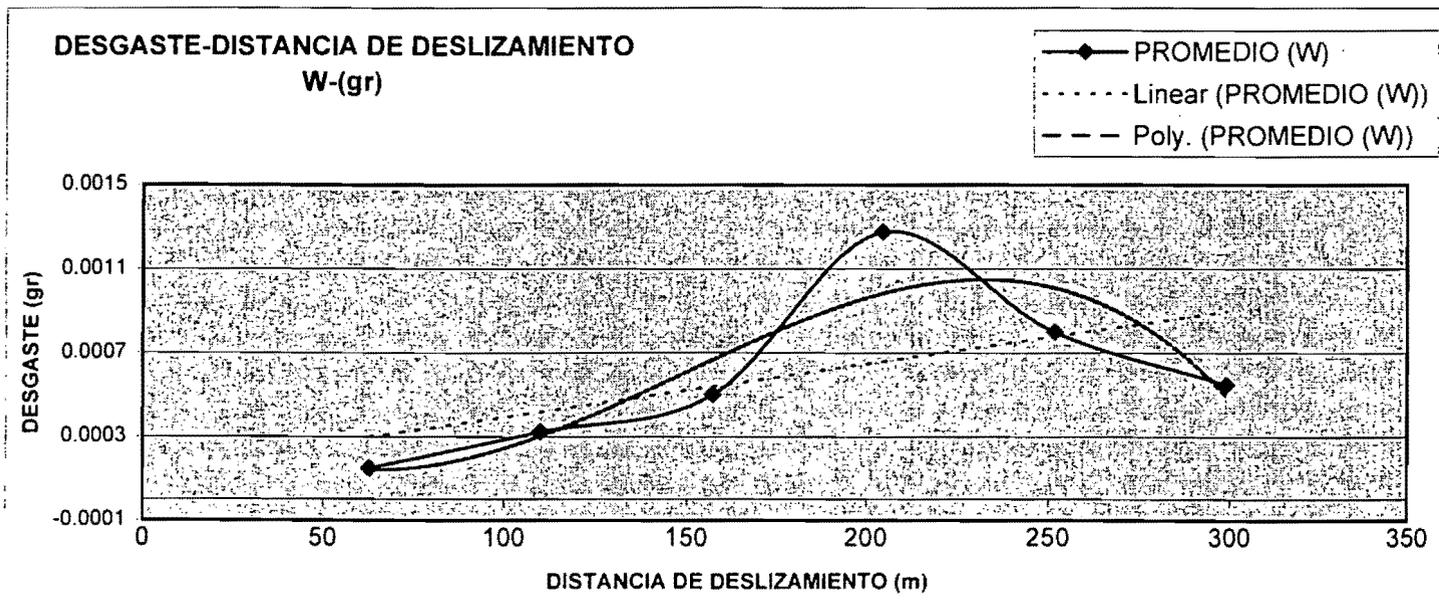
	Distancia de deslizamiento (m)	Desgaste W (gr)				PROMEDIO (W)
		PRUEBAS 1-6	PRUEBAS 7-12	PRUEBAS 25-30	PRUEBAS 31-36	
1	62.832	0.0002	0.0001	0.0001	0.0002	0.0002
2	109.956	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
3	157.08	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
4	204.38	0.0014	0.0012	0.0013	0.0012	0.0013
5	251.68	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008
6	298.98	0.0005	0.0005	0.0006	0.0006	0.0006

$y = 3E-06x + 0.0001$

$y = -4E-10x^3 + 2E-07x^2 - 2E-05x + 0.0007$

LINEAL

POLINOMIAL



W-S

GRAFICO 4

TENDENCIA DEL COMPORTAMIENTO EN DESGASTE DE UN ACERO
H13 EN ESTADO RECOCIDO

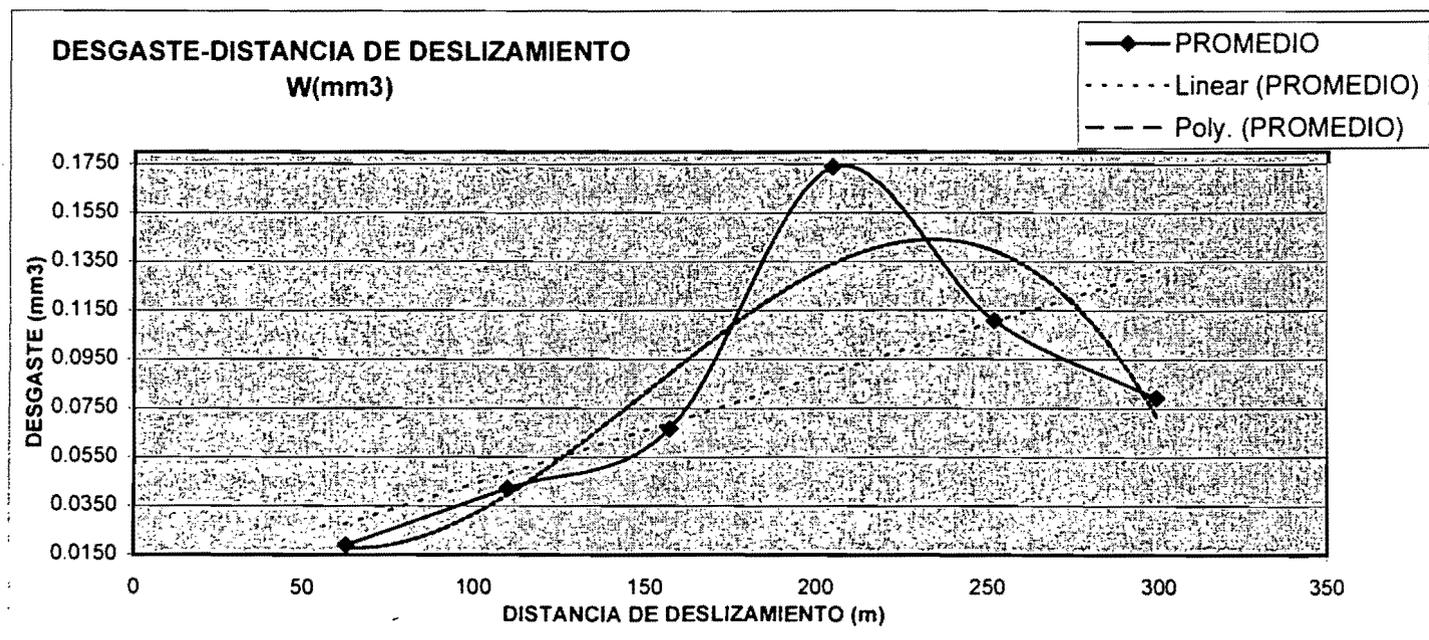
	Distancia de deslizamiento (m)	Desgaste W (mm ³)				PROMEDIO
		PRUEBAS 1-6	PRUEBAS 7-12	PRUEBAS 25-30	PRUEBAS 31-36	
1	62.832	0.0213	0.0137	0.0168	0.0244	0.0191
2	109.956	0.0488	0.0351	0.0442	0.0412	0.0423
3	157.08	0.0686	0.0671	0.0625	0.0686	0.0667
4	204.38	0.1920	0.1585	0.1738	0.1707	0.1738
5	251.68	0.1067	0.1158	0.1113	0.1097	0.1109
6	298.98	0.0732	0.0747	0.0823	0.0869	0.0793

$$y = -5E-08x^3 + 2E-05x^2 - 0.0024x + 0.0903$$

$$y = 0.0004x + 1E-05$$

LINEAL

POLINOMIAL

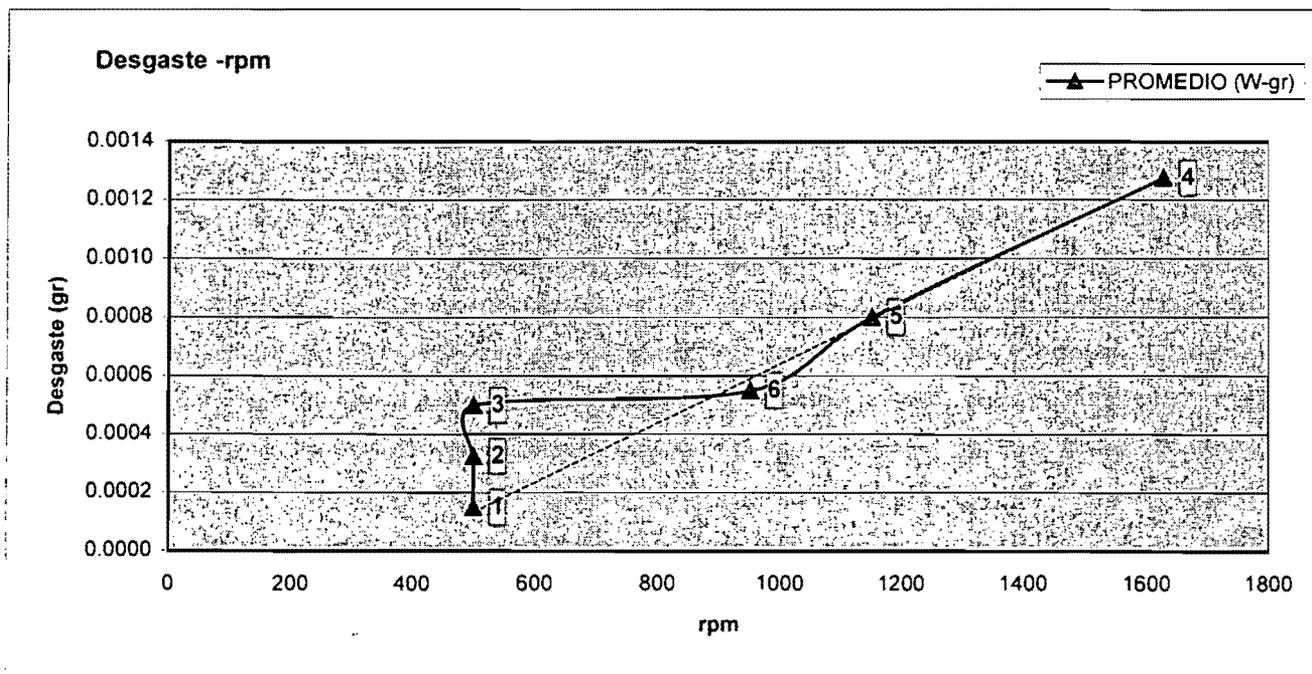


W-rpm

GRAFICO 5

EVALUACIÓN DE W (gr) RESPECTO A LAS rpm REALZADAS
 POR PUNTO DE ANÁLISIS
 H13 EN ESTADO RECOCIDO

Puntos de estudio	rpm recorridas	Desgaste W (gr)
		PROMEDIO (W-gr)
1	500	0.0002
2	500	0.0003
3	500	0.0005
6	950	0.0006
5	1150	0.0008
4	1625	0.0013



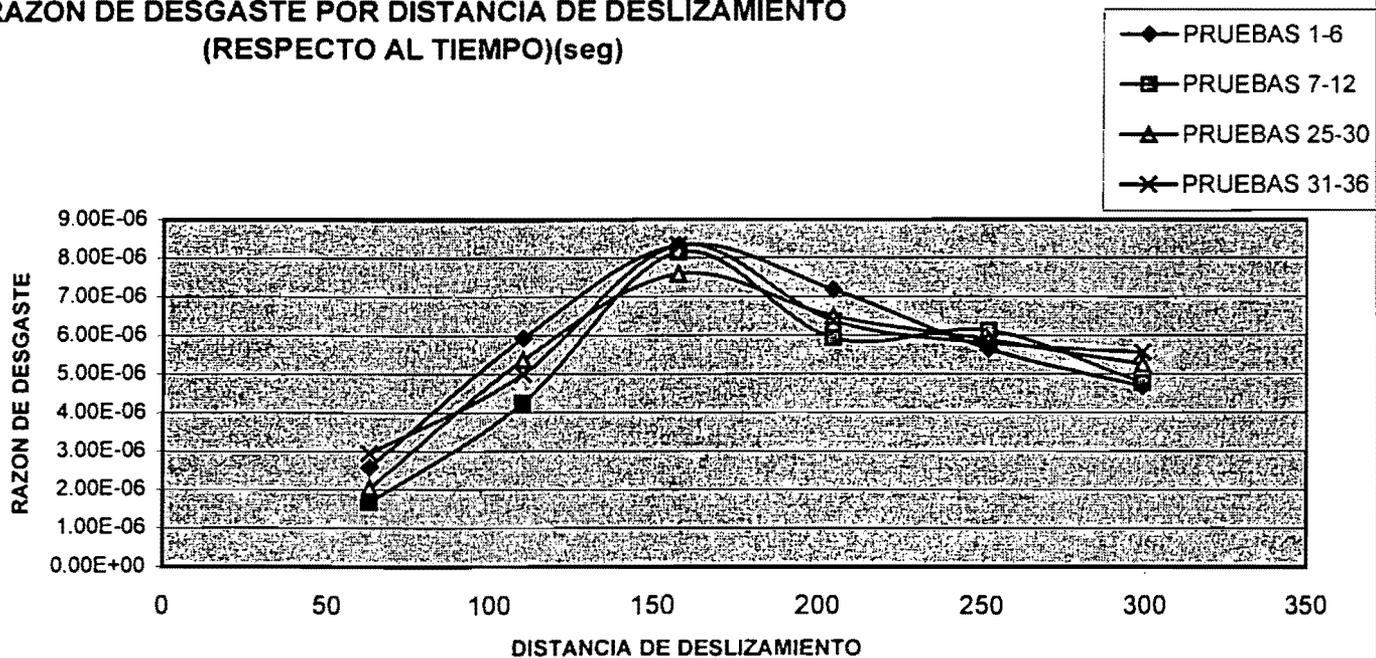
Razón de desgaste $W-t$ (seg)

GRAFICO 6

ACERO H13 EN ESTADO RECOCIDO.

	Distancia de deslizamiento (m)	Razón de desgaste W (gr)			
		PRUEBAS 1-6	PRUEBAS 7-12	PRUEBAS 25-30	PRUEBAS 31-36
1	62.832	2.59E-06	1.67E-06	2.04E-06	2.96E-06
2	109.956	5.93E-06	4.26E-06	5.37E-06	5.00E-06
3	157.08	8.33E-06	8.15E-06	7.59E-06	8.33E-06
4	204.38	7.18E-06	5.93E-06	6.50E-06	6.38E-06
5	251.68	5.64E-06	6.12E-06	5.88E-06	5.80E-06
6	298.98	4.68E-06	4.78E-06	5.26E-06	5.56E-06

RAZÓN DE DESGASTE POR DISTANCIA DE DESLIZAMIENTO
(RESPECTO AL TIEMPO)(seg)



Razón de desgasteW-t (seg)

GRAFICO 7

TENDENCIA DEL COMPORTAMIENTO DE LA RAZÓN DE DESGASTE DE UN ACERO H13 EN ESTADO RECOCIDO

	Distancia de deslizamiento (m)	Razón de desgaste W (gr)				PROMEDIO
		PRUEBAS 1-6	PRUEBAS 7-12	PRUEBAS 25-30	PRUEBAS 31-36	
1	62.832	2.59E-06	1.67E-06	2.04E-06	2.96E-06	2.32E-06
2	109.956	5.93E-06	4.26E-06	5.37E-06	5.00E-06	5.14E-06
3	157.08	8.33E-06	8.15E-06	7.59E-06	8.33E-06	8.10E-06
4	204.38	7.18E-06	5.93E-06	6.50E-06	6.38E-06	6.50E-06
5	251.68	5.64E-06	6.12E-06	5.88E-06	5.80E-06	5.86E-06
6	298.98	4.68E-06	4.78E-06	5.26E-06	5.56E-06	5.07E-06

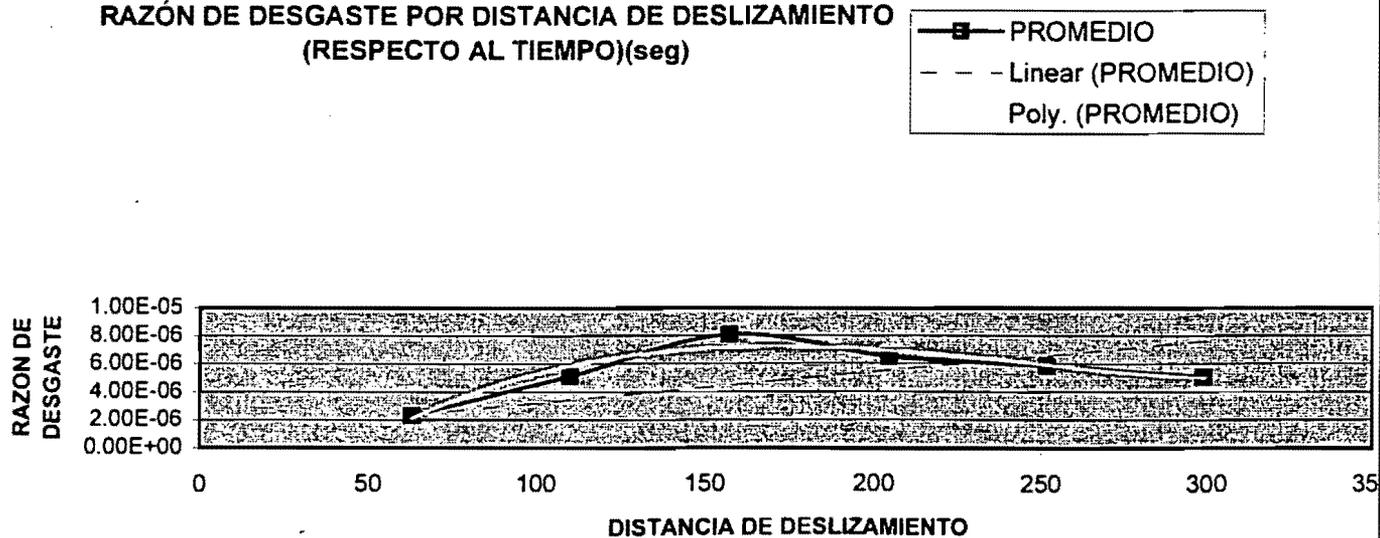
$$y = 9E-09x + 4E-06$$

$$y = 1E-12x^3 - 1E-09x^2 + 2E-07x - 8E-06$$

LINEAL

POLINOMIAL

RAZÓN DE DESGASTE POR DISTANCIA DE DESLIZAMIENTO (RESPECTO AL TIEMPO)(seg)

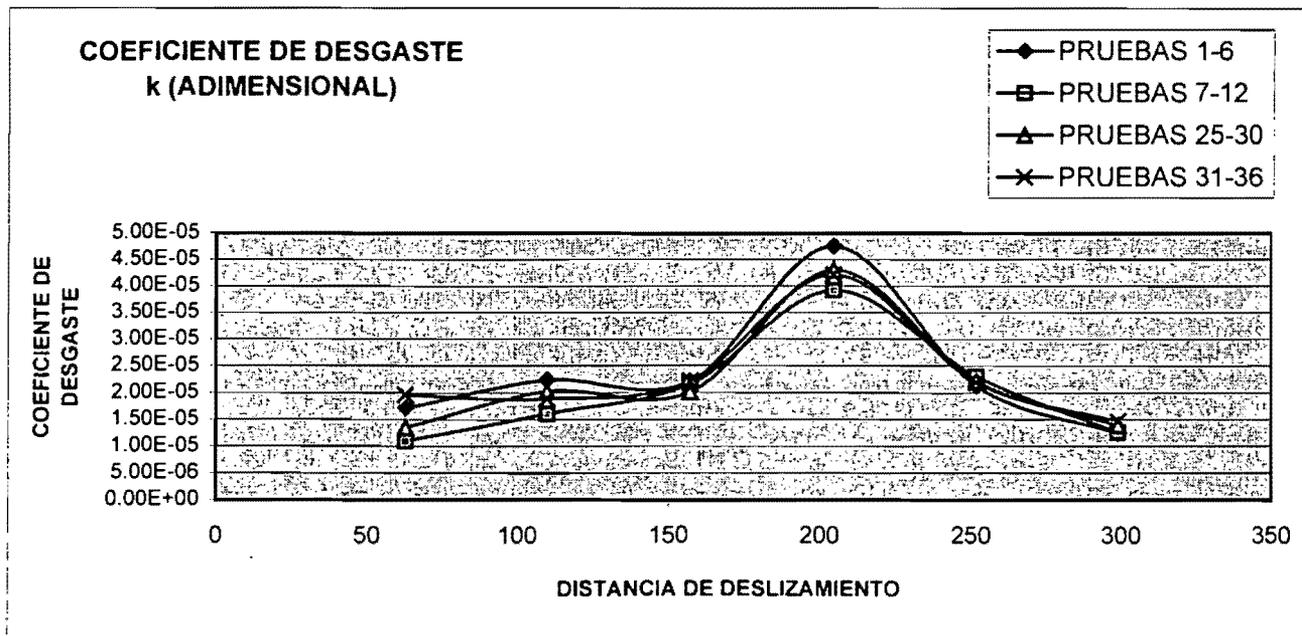


Coef de W

GRAFICO 8

ACERO H13 EN ESTADO RECOCIDO.

	Distancia de deslizamiento (m)	Coeficiente de desgaste k (adimensional)			
		PRUEBAS 1-6	PRUEBAS 7-12	PRUEBAS 25-30	PRUEBAS 31-36
1	62.832	1.72E-05	1.10E-05	1.35E-05	1.96E-05
2	109.956	2.24E-05	1.61E-05	2.03E-05	1.89E-05
3	157.08	2.21E-05	2.16E-05	2.01E-05	2.21E-05
4	204.38	4.75E-05	3.92E-05	4.30E-05	4.22E-05
5	251.68	2.13E-05	2.31E-05	2.22E-05	2.19E-05
6	298.98	1.24E-05	1.26E-05	1.39E-05	1.47E-05

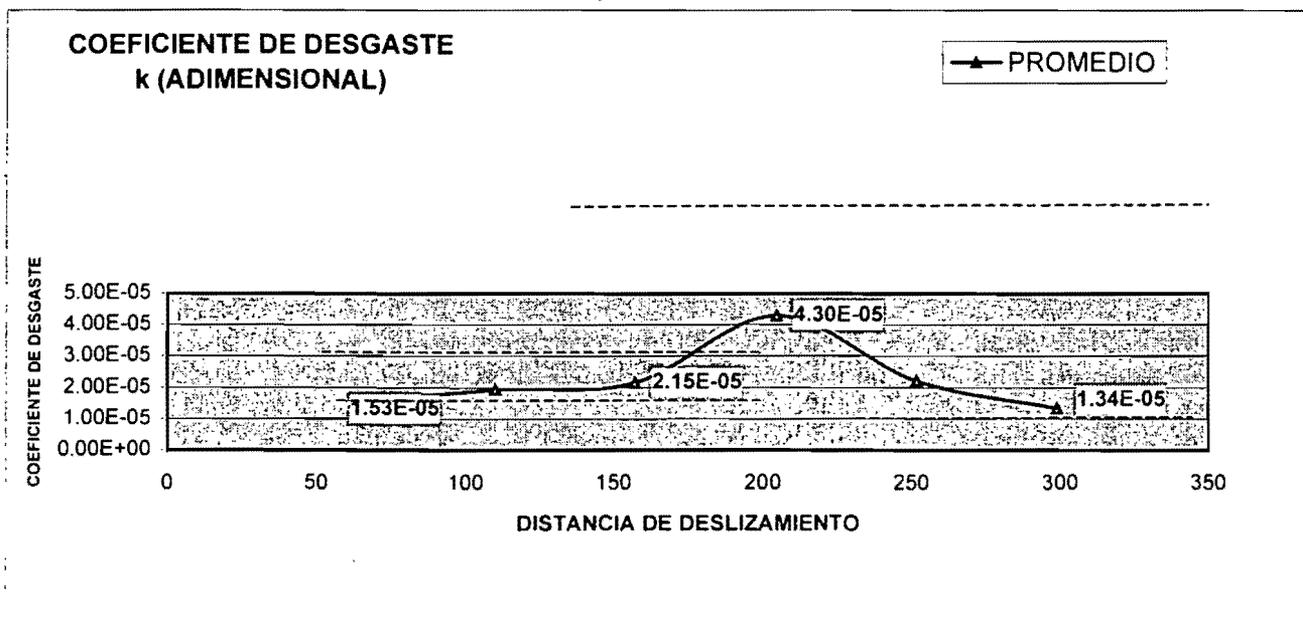


Coef de W

GRAFICO 9

ACERO H13 EN ESTADO RECOCIDO.

	Distancia de deslizamiento (m)	Coeficiente de desgaste k (adimensional)				PROMEDIO
		PRUEBAS 1-6	PRUEBAS 7-12	PRUEBAS 25-30	PRUEBAS 31-36	
1	62.832	1.72E-05	1.10E-05	1.35E-05	1.96E-05	1.53E-05
2	109.956	2.24E-05	1.61E-05	2.03E-05	1.89E-05	1.94E-05
3	157.08	2.21E-05	2.16E-05	2.01E-05	2.21E-05	2.15E-05
4	204.38	4.75E-05	3.92E-05	4.30E-05	4.22E-05	4.30E-05
5	251.68	2.13E-05	2.31E-05	2.22E-05	2.19E-05	2.21E-05
6	298.98	1.24E-05	1.26E-05	1.39E-05	1.47E-05	1.34E-05

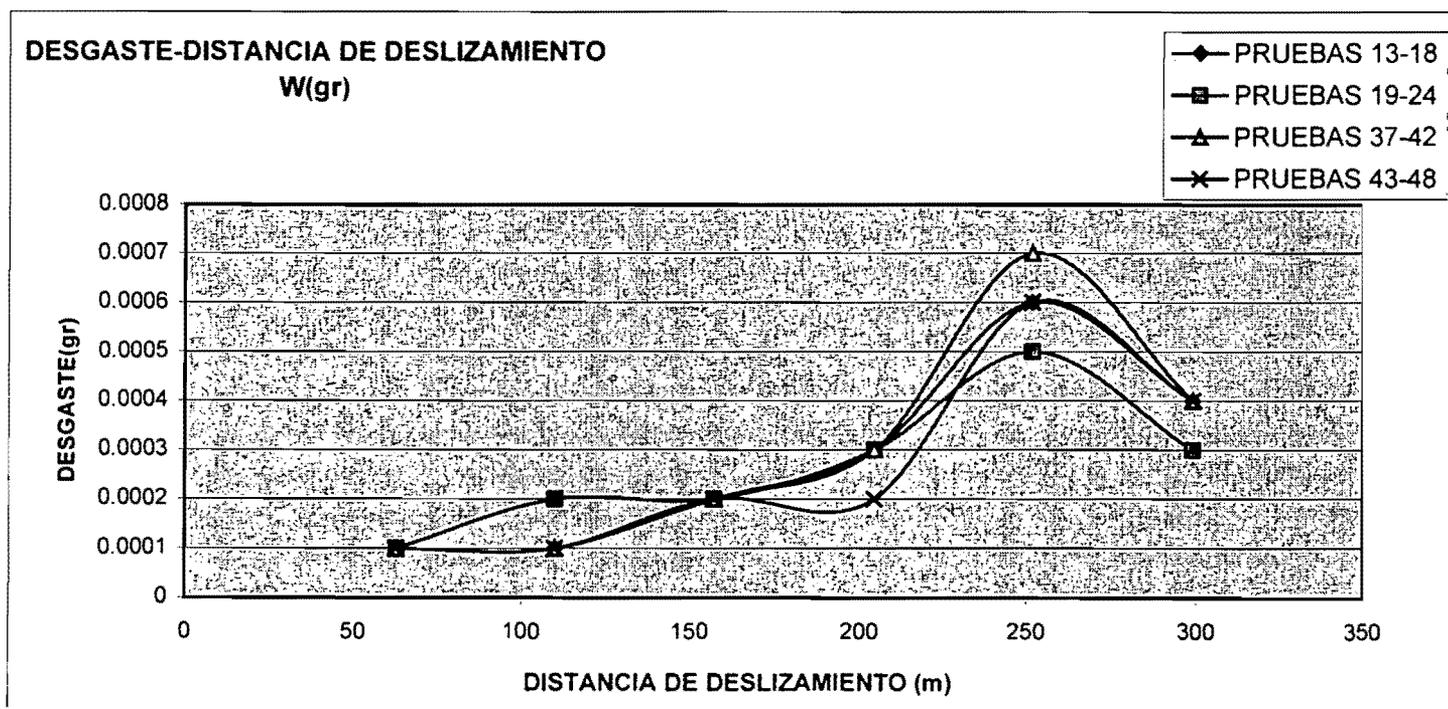


W-S

GRAFICO 10

ACERO H13 EN ESTADO TEMPLADO-REVENIDO

	Distancia de deslizamiento (m)	Desgaste W (gr)			
		PRUEBAS 13-18	PRUEBAS 19-24	PRUEBAS 37-42	PRUEBAS 43-48
1	62.832	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
2	109.956	0.0001	0.0002	0.0001	0.0001
3	157.08	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
4	204.38	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002
5	251.68	0.0006	0.0005	0.0007	0.0006
6	298.98	0.0004	0.0003	0.0004	0.0004



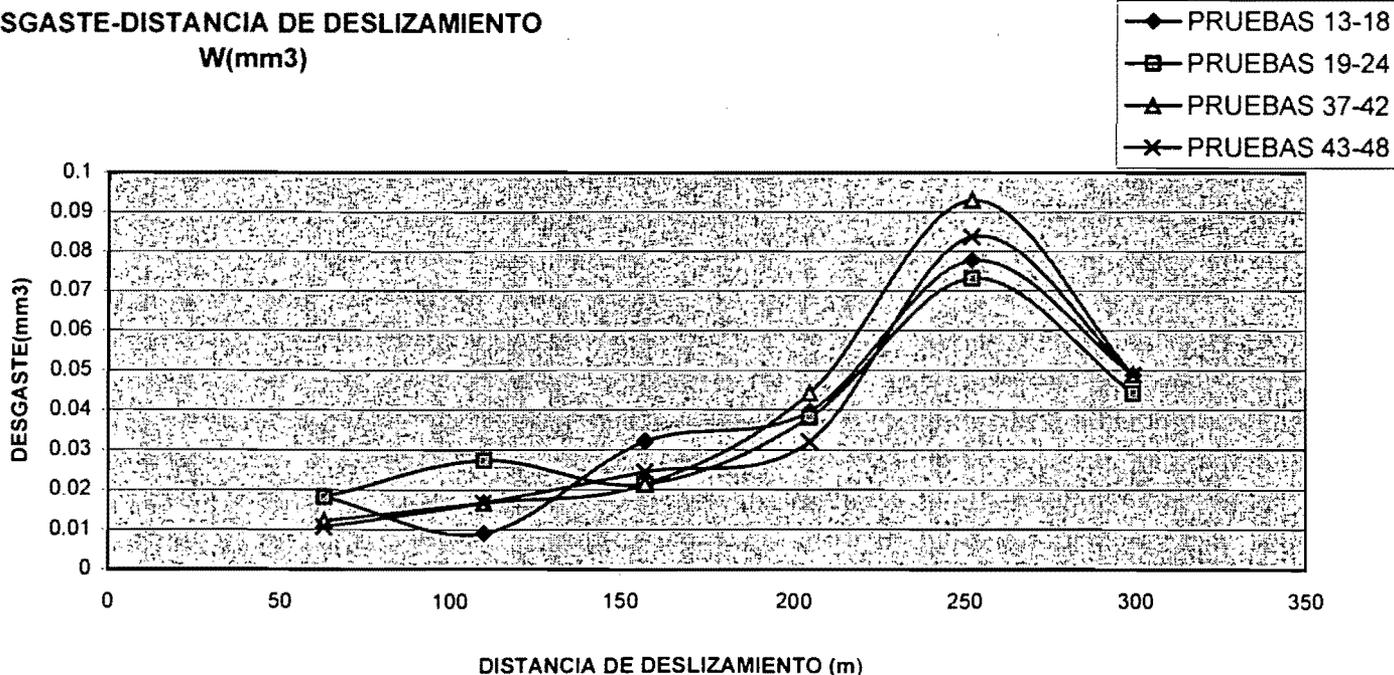
W-S

GRAFICO 11

ACERO H13 EN ESTADO TEMPLADO-REVENIDO

	Distancia de deslizamiento (m)	Desgaste W (mm ³)			
		PRUEBAS 13-18	PRUEBAS 19-24	PRUEBAS 37-42	PRUEBAS 43-48
1	62.832	0.0183	0.0183	0.0122	0.0107
2	109.956	0.0091	0.0274	0.0168	0.0168
3	157.08	0.0320	0.0213	0.0213	0.0244
4	204.38	0.0396	0.0381	0.0442	0.0320
5	251.68	0.0777	0.0732	0.0930	0.0838
6	298.98	0.0488	0.0442	0.0488	0.0488

DESGASTE-DISTANCIA DE DESLIZAMIENTO
W(mm³)



W-S

GRAFICO 12

ACERO H13 EN ESTADO TEMPLADO-REVENIDO

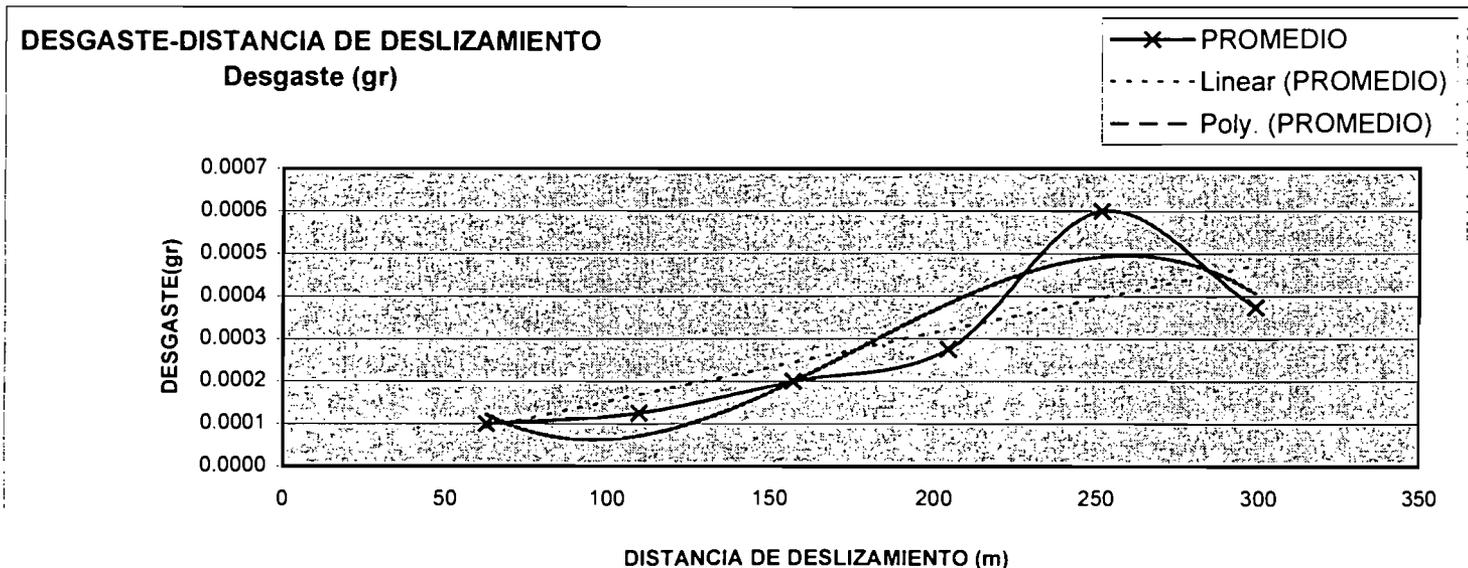
	Distancia de deslizamiento (m)	Desgaste W (gr)				PROMEDIO
		PRUEBAS 13-18	PRUEBAS 19-24	PRUEBAS 37-42	PRUEBAS 43-48	
1	62.832	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
2	109.956	0.0001	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001
3	157.08	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
4	204.38	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0003
5	251.68	0.0006	0.0005	0.0007	0.0006	0.0006
6	298.98	0.0004	0.0003	0.0004	0.0004	0.0004

$$y = 2E-06x - 1E-05$$

$$y = -2E-10x^3 + 1E-07x^2 - 1E-05x + 0.0007$$

LINEAL

POLINOMIAL



W-S

GRAFICO 13

ACERO H13 EN ESTADO TEMPLADO-REVENIDO

	Distancia de deslizamiento (m)	Desgaste W (mm ³)				PROMEDIO
		PRUEBAS 13-18	PRUEBAS 19-24	PRUEBAS 37-42	PRUEBAS 43-48	
1	62.832	0.0183	0.0183	0.0122	0.0107	0.0149
2	109.956	0.0093	0.0274	0.0168	0.0168	0.0176
3	157.08	0.0320	0.0213	0.0213	0.0244	0.0248
4	204.38	0.0396	0.0381	0.0442	0.0320	0.0385
5	251.68	0.0777	0.0732	0.0930	0.0838	0.0819
6	298.98	0.0488	0.0442	0.0488	0.0488	0.0477

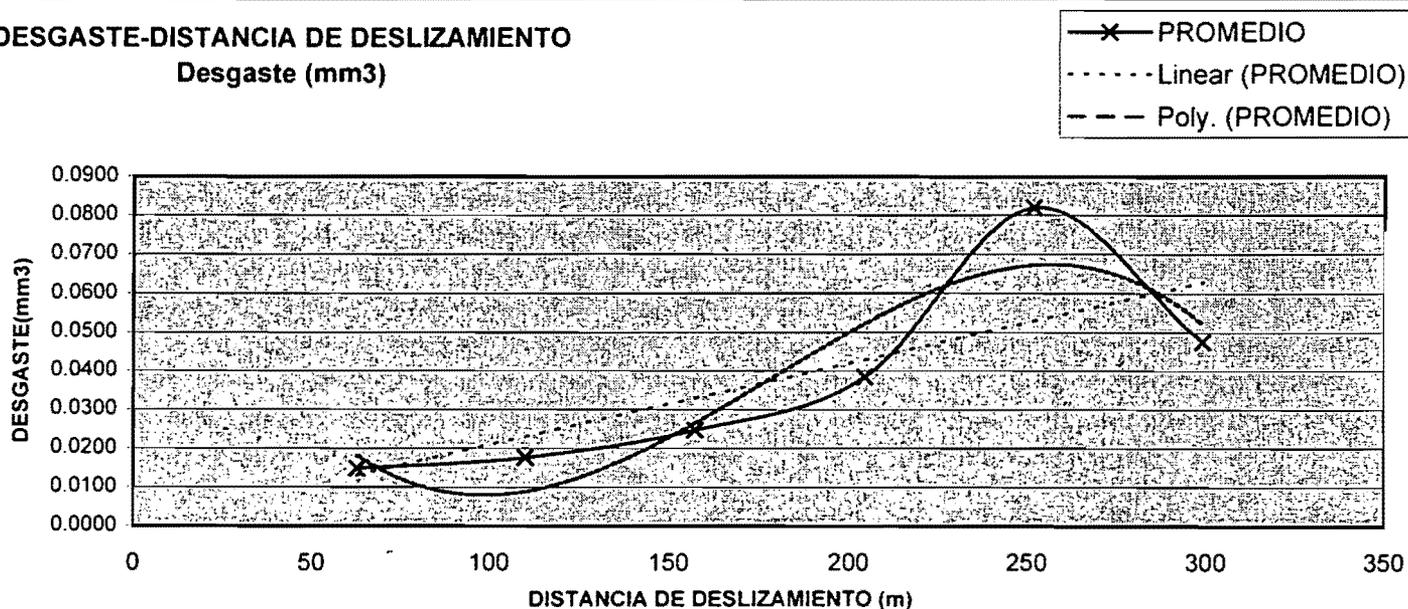
$y = 0.0001x + 0.0089$

$y = -4E-08x^3 + 2E-05x^2 - 0.0031x + 0.1375$

LINEAL

POLINOMIAL

DESGASTE-DISTANCIA DE DESLIZAMIENTO
Desgaste (mm³)

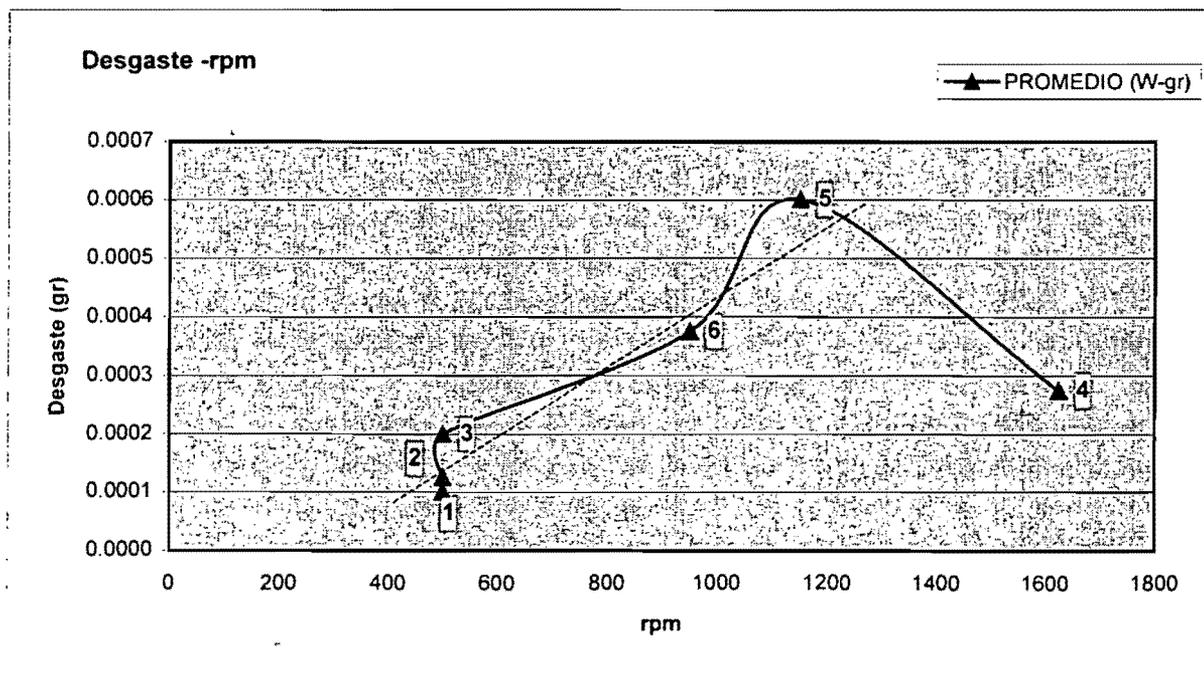


W - rpm

GRAFICO 14

**EVALUACIÓN DE W (gr) RESPECTO A LAS rpm REALZADAS
POR PUNTO DE ANÁLISIS
H13 EN ESTADO TEMPLADO - REVENIDO**

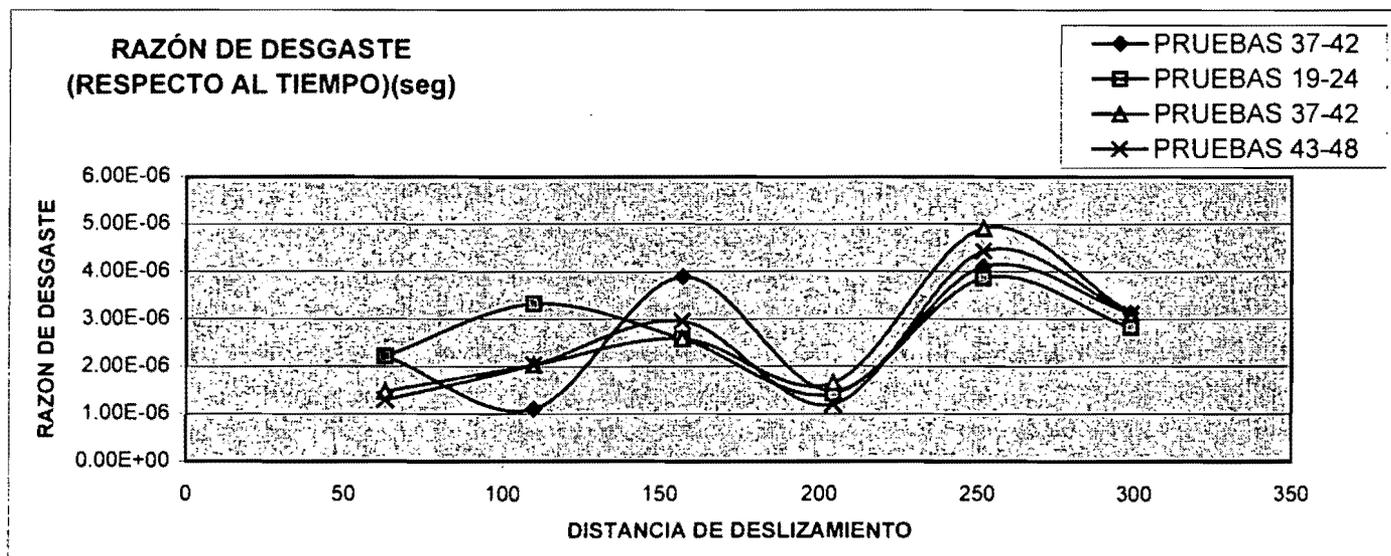
Puntos de estudio	rpm recorridas	Desgaste W (gr)
		PROMEDIO (W-gr)
1	500	0.0001
2	500	0.0001
3	500	0.0002
6	950	0.0004
5	1150	0.0006
4	1625	0.0003



Razón de desgasteW-t (seg)

GRAFICO 15**ACERO H13 EN ESTADO TEMPLADO-REVENIDO**

	Distancia de deslizamiento (m)	Razón de desgaste W (gr)			
		PRUEBAS 13-18	PRUEBAS 19-24	PRUEBAS 37-42	PRUEBAS 43-48
1	62.832	2.22E-06	2.22E-06	1.48E-06	1.30E-06
2	109.956	1.11E-06	3.33E-06	2.04E-06	2.04E-06
3	157.08	3.89E-06	2.59E-06	2.59E-06	2.96E-06
4	204.38	1.48E-06	1.42E-06	1.65E-06	1.20E-06
5	251.68	4.11E-06	3.86E-06	4.91E-06	4.43E-06
6	298.98	3.12E-06	2.83E-06	3.12E-06	3.12E-06



Razón de desgaste W-t (seg)

GRAFICO 16

ACERO H13 EN ESTADO TEMPLADO-REVENIDO

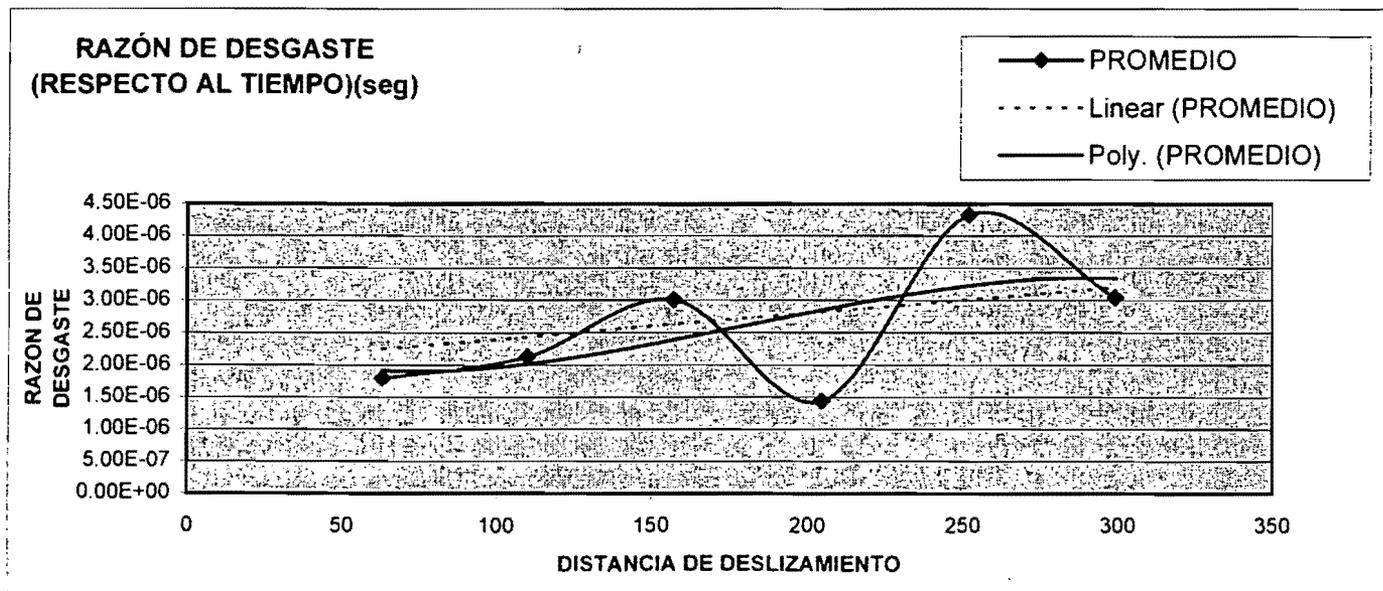
	Distancia de deslizamiento (m)	Razón de desgaste W (gr)				PROMEDIO
		PRUEBAS 13-18	PRUEBAS 19-24	PRUEBAS 37-42	PRUEBAS 43-48	
1	62.832	2.22E-06	2.22E-06	1.48E-06	1.30E-06	1.81E-06
2	109.956	1.11E-06	3.33E-06	2.04E-06	2.04E-06	2.13E-06
3	157.08	3.89E-06	2.59E-06	2.59E-06	2.96E-06	3.01E-06
4	204.38	1.48E-06	1.42E-06	1.65E-06	1.20E-06	1.44E-06
5	251.68	4.11E-06	3.86E-06	4.91E-06	4.43E-06	4.33E-06
6	298.98	3.12E-06	2.83E-06	3.12E-06	3.12E-06	3.05E-06

$y = 7E-09x + 1E-06$

$y = -3E-13x^3 + 1E-10x^2 - 2E-08x + 2E-06$

LINEAL

POLINOMIAL

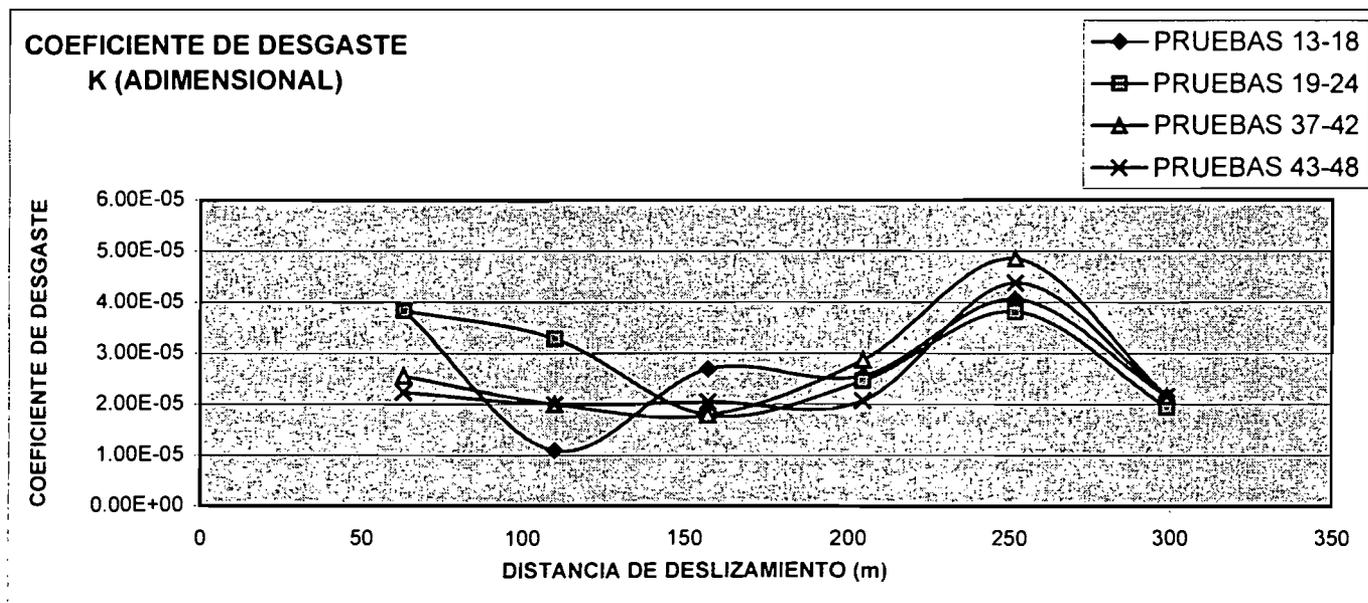


Coef de W

GRAFICO 17

ACERO H13 EN ESTADO TEMPLADO-REVENIDO

	Distancia de deslizamiento (m)	Coeficiente de desgaste k (adimensional)			
		PRUEBAS 13-1	PRUEBAS 19-24	PRUEBAS 37-42	PRUEBAS 43-48
1	62.832	3.84E-05	3.84E-05	2.56E-05	2.24E-05
2	109.956	1.10E-05	3.29E-05	2.01E-05	2.01E-05
3	157.08	2.69E-05	1.79E-05	1.79E-05	2.05E-05
4	204.38	2.56E-05	2.46E-05	2.86E-05	2.07E-05
5	251.68	4.06E-05	3.82E-05	4.85E-05	4.38E-05
6	298.98	2.16E-05	1.95E-05	2.16E-05	2.16E-05

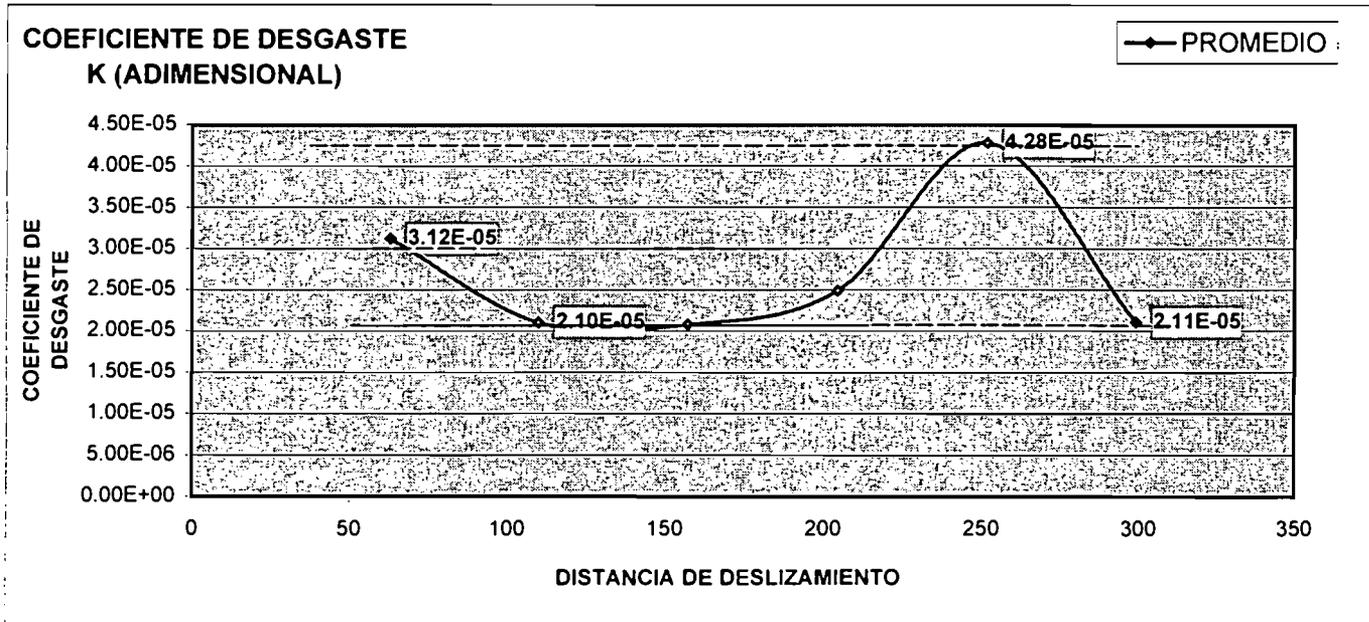


Coef de W

GRAFICO 18

ACERO H13 EN ESTADO TEMPLADO-REVENIDO

	Distancia de deslizamiento (m)	Coeficiente de desgaste k (adimensional)				PROMEDIO
		PRUEBAS 13-1	PRUEBAS 19-24	PRUEBAS 37-42	PRUEBAS 43-48	
1	62.832	3.84E-05	3.84E-05	2.56E-05	2.24E-05	3.12E-05
2	109.956	1.10E-05	3.29E-05	2.01E-05	2.01E-05	2.10E-05
3	157.08	2.69E-05	1.79E-05	1.79E-05	2.05E-05	2.08E-05
4	204.38	2.56E-05	2.46E-05	2.86E-05	2.07E-05	2.49E-05
5	251.68	4.06E-05	3.82E-05	4.85E-05	4.38E-05	4.28E-05
6	298.98	2.16E-05	1.95E-05	2.16E-05	2.16E-05	2.11E-05

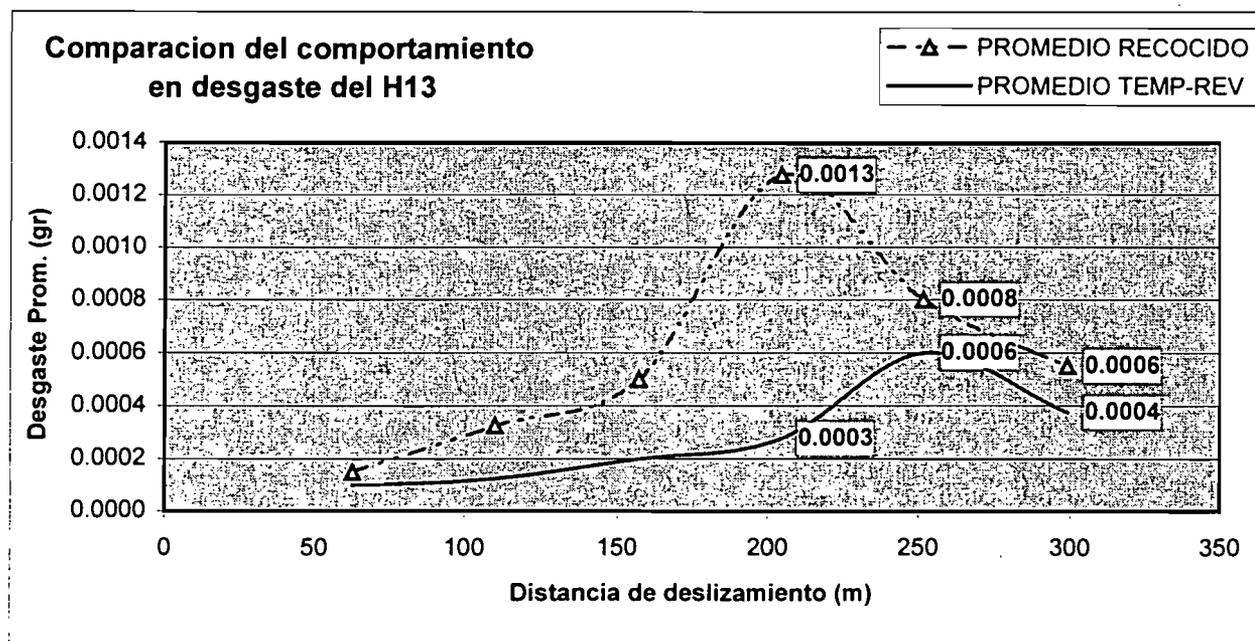


Comp. w prom

GRAFICO 19

COMPARACION DEL COMPORTAMIENTO DE W/Dist. Desliz. DEL H13
ESTADO RECOCIDO VERSUS TEMPLADO-REVENIDO

	Distancia de deslizamiento (m)	Desgaste W (gr)	
		PROMEDIO RECOCIDO	PROMEDIO TEMP-REV
		1	62.832
2	109.956	0.0003	0.0001
3	157.08	0.0005	0.0002
4	204.38	0.0013	0.0003
5	251.68	0.0008	0.0006
6	298.98	0.0006	0.0004



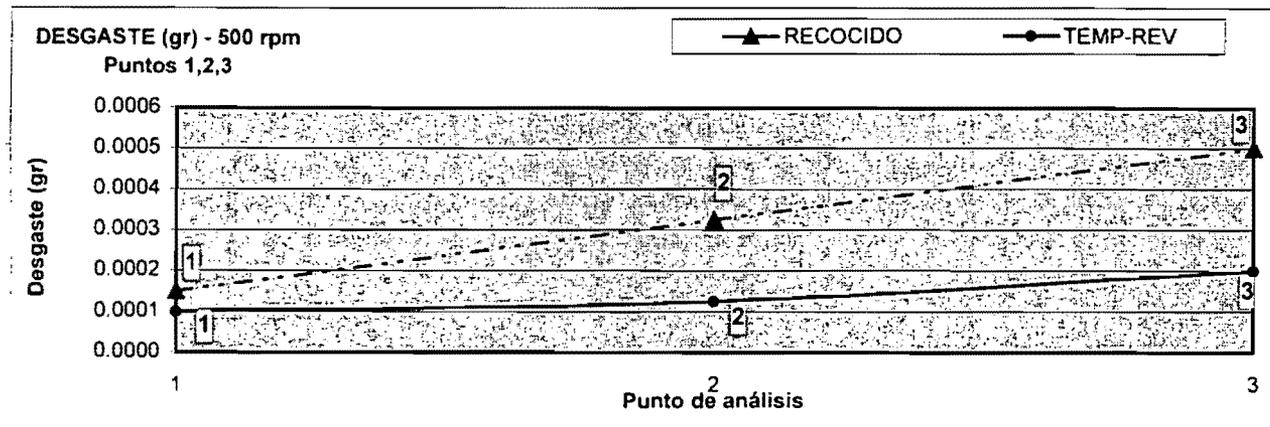
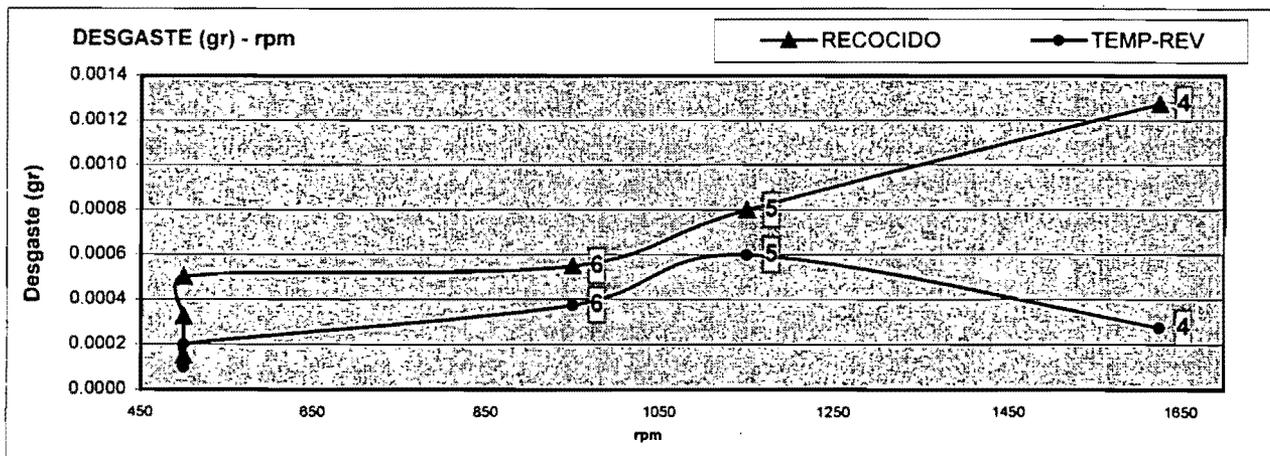
AVG W-rpm

GRAFICO 20

COMPARACIÓN DE W (gr) RESPECTO A LAS rpm REALIZADAS POR PUNTO DE ANÁLISIS

H13, ESTADO RECOCIDO VERSUS TEMPLADO - REVENIDO

Puntos de estudio	r.p.m. recorridas	Desgaste W (gr)	Desgaste W (gr)
		RECOCIDO PROMEDIO (W-gr)	TEMP-REV PROMEDIO (W-gr)
1	500	0.0002	0.0001
2	500	0.0003	0.0001
3	500	0.0005	0.0002
6	950	0.0006	0.0004
5	1150	0.0008	0.0006
4	1625	0.0013	0.0003



8.2.- Discusión.

Con el equipo utilizado para este estudio se pueden evaluar hasta 9 probetas por prueba (3 distancias de deslizamiento diferentes), sin embargo, como resultado de pruebas preliminares realizadas para este estudio, no es recomendable debido a que obtuvimos variaciones en los resultados mayores a un 25%, por lo que decidimos realizar pruebas sólo con 3 probetas, es decir un punto o distancia de deslizamiento por vez.

Observamos que para el acero H13 (tablas 1 a 16), si la evaluación de su comportamiento en desgaste la realizáramos de probeta a probeta de prueba, los resultados que obtuviéramos variarían considerablemente debido a, entre otras cosas:

- 1.- Por la propia naturaleza del fenómeno de desgaste y,
- 2.- Por lo difícil que resultaría trabajar en un mismo plano en este tipo de equipos, es decir, el plano de asentamiento (área de contacto real) que presentaran las 3 probetas analizadas en cada prueba, difícilmente sería el mismo, a pesar de que éste, a simple vista así pareciera.

Lo anterior es debido a que en un nivel microscópico, como vimos en el Capítulo II, los asentamientos entre superficies para cada punto varían de crestas a valles. Además, hay que hacer la observación que para la medición del desgaste estamos considerando 4 decimales, número de decimales mínimo sugerido para este tipo de estudio, Capítulo V. Esto también afecta, debido al redondeo que genera el software utilizado en el procesamiento de datos, por lo cual, estas situaciones harían difícil definir un comportamiento general para obtener un criterio del estudio realizado.

Como resultado de ello, el desgaste obtenido, es el promedio de 3 probetas por prueba analizadas (tablas 1 a 16). Además, para tener una mejor exactitud en los resultados, para cada una de ellas obtuvimos 3 valores de peso, los cuales promediamos para obtener un valor de desgaste $W(\text{gr})$. De esta forma, bajo estas condiciones y en este caso en particular, buscamos tener la mayor exactitud, al hablar del comportamiento en desgaste del acero H13 evaluado en este estudio.

El comportamiento en desgaste del acero H13, tanto en estado recocido como templado y revenido lo evaluamos para 6 puntos o distancias de deslizamiento.

Para el acero H13 en estado recocido, realizamos 24 pruebas (tablas 1 a 8). Graficando los resultados, observamos que:

En el gráfico 1, evaluamos el desgaste por pérdida de peso y en el gráfico 2, obtenido a partir del gráfico 1, evaluamos el desgaste por pérdida de volumen. Como esperábamos, las curvas presentadas en los dos gráficos anteriores son similares, aunque se presentaron pequeñas variaciones.

Si consideramos el punto donde se presentó mayor desgaste, (Punto 4 ≈ 200 m), pruebas 4, 10, 28 y 34, podemos observar que la variaciones del valor de desgaste de dicho punto, respecto al valor de desgaste mínimo obtenido, son menores a un 25%, porcentaje de variación máximo permisible en pruebas de desgaste, Capítulo II.

En los gráficos 3 y 4, para cada una de las distancias evaluadas en las 24 pruebas, promediamos todos los valores de desgaste $W(\text{gr})$ y $W(\text{mm}^3)$ obtenidos. Observamos, que agregando líneas de tendencia correspondientes a una ecuación polinomial de tercer grado y a una ecuación lineal, el comportamiento del desgaste obtenido, respecto a la distancia de deslizamiento recorrida, se acerca más un comportamiento lineal. Los puntos que no siguieron dicho comportamiento son los puntos 4 y 6, lo cual consideramos es debido a:

- 1.- Que el punto 4 correspondiente a ≈ 200 m, es donde se presentó mayor desgaste y,
- 2.- Que el punto 6 correspondiente a ≈ 300 m, es el punto correspondiente a la mayor distancia de deslizamiento de análisis.

Consideramos que ambas situaciones, son factores que afectan la variación del comportamiento en desgaste del acero H13 en estado recocido.

Nuevamente, si consideramos el punto donde se presentó mayor desgaste (punto 4) correspondiente a una distancia de ≈ 200 m y además, considerando que en las pruebas tanto la carga aplicada (L), como la velocidad (ω), permanecen constantes, y lo que varía es el tiempo de prueba y las distancias de deslizamiento, tenemos lo siguiente:

Si observamos el gráfico 5, vemos que para el recorrido del punto 4 se tuvieron que realizar ≈ 1625 r.p.m. y para los puntos 5 y 6, ≈ 1150 r.p.m. y ≈ 950 r.p.m. respectivamente. Esto es debido a que la distancia recorrida por el punto 4 en una r.p.m. es de ≈ 0.125 m, mientras que para los puntos 5 y 6, las distancias recorridas en una r.p.m. son de ≈ 0.220 m y ≈ 0.314 m respectivamente.

Lo anterior significa que en estas condiciones, el acero H13, tiene que pasar por un mismo punto 1625 veces para recorre ≈ 200 m, número de veces mayor que cualquiera de las otras distancias o puntos analizados.

En los gráficos 6 y 7, presentamos el comportamiento de la razón de desgaste respecto al tiempo, correspondiente a cada punto o distancia de deslizamiento evaluada. Observamos, que del primer al tercer punto de análisis, es decir, de ≈ 60 m hasta ≈ 160 m; la razón de desgaste presentó una pendiente positiva, mientras que para los últimos 4 puntos, (≈ 160 m a ≈ 300 m), la pendiente de la razón de desgaste es negativa.

Esto puede ser debido a la naturaleza del fenómeno de desgaste presente en su etapa inicial, debido a que observamos que en los 3 primeros puntos de análisis la razón de desgaste que se presentó es considerablemente grande, sin embargo, al llegar al tercer punto, la razón de desgaste comienza a decrecer debido a que en ese punto las características de la superficie del material son propicias para adaptarse a las condiciones del tribosistema, lo que da como resultado, un decremento en la razón de desgaste en los puntos siguientes. Este comportamiento lo podemos observar mejor, al anexar líneas de tendencia. La aproximación más cercana del comportamiento de la razón de desgaste respecto al tiempo, la obtuvimos con una ecuación polinomial de tercer grado, tal y como observamos en el gráfico 7.

Por su parte el coeficiente de desgaste, gráfico 8, obedeció el comportamiento que observamos en los parámetros de desgaste evaluados hasta el momento, es decir, un incremento en los primeros cuatro puntos y a partir del cuarto punto un decremento del coeficiente de desgaste.

Los datos que obtuvimos para los cuatro primeros puntos que oscilan entre $1.53E-05$ y $4.30E-05$, nos indican valores muy próximos a los valores de k establecidos para que consideremos la presencia de desgaste severo. La presencia de este tipo de desgaste nos puede servir como fundamento para identificar un proceso en el cual se lleva a cabo el acondicionamiento de la superficie de contacto del tribosistema. Consideramos esto, debido a que del cuarto punto ($k = 4.30 E-05$) al último punto de análisis ($k = 1.34E-05$), observamos que el coeficiente de desgaste disminuye $\approx 30\%$. Sin embargo, aún se está en los valores límites inferiores para que consideremos la presencia de desgaste severo, Capítulo I. Esta variación de acuerdo a la literatura de los estudios de desgaste de este tipo, es considerada como un indicativo probable de un cambio de mecanismo de desgaste, debido al acondicionamiento que se presentó en las superficies de contacto del tribosistema, Capítulo II.

Por su parte, el acero H13 en estado templado y revenido, también lo evaluamos en 24 pruebas (tablas 9 a 16), y como mencionamos, para los mismos 6 puntos o distancias de deslizamiento que en el acero H13 en estado recocido. Graficando los resultados, observamos que:

En el gráfico 10, evaluamos el desgaste por pérdida de peso y en el gráfico 11, obtenido a partir del gráfico 10, evaluamos el desgaste por pérdida de volumen. Tal y como esperábamos, al igual que en el acero H13 en estado recocido, las curvas presentadas en los gráficos 10 y 11 son similares, aunque presentaron pequeñas variaciones.

También observamos que para el acero H13, ahora en estado templado y revenido, el punto 5 es donde se presentó el mayor desgaste (≈ 250 m), pruebas 17, 23, 41 y 47. Al igual que como ocurrió en las pruebas para el acero H13 en estado recocido, las variaciones del punto 5 presentes, respecto al valor de desgaste mínimo obtenido, son menores a un 25%, porcentaje de variación máximo permisible en pruebas de desgaste, Capítulo II.

En los gráficos 12 y 13, promediamos todos los valores de desgaste $W(\text{gr})$ y $W(\text{mm}^3)$ obtenidos para cada una de las distancias evaluadas en las 24 pruebas. Observamos, que al anexar líneas de tendencia para los puntos de análisis del comportamiento en desgaste del acero H13 en estado templado y revenido, éste se aproximó más a un comportamiento lineal. En este caso quien no siguió el comportamiento lineal, es precisamente el punto o distancia de deslizamiento donde se presentó el mayor desgaste.

En el gráfico 14, evaluamos el desgaste por r.p.m. realizadas. En este caso, observamos que el punto 5 donde ocurrió el mayor desgaste, no corresponde al punto de mayor r.p.m. recorridas.

A lo anterior mencionamos lo siguiente:

El punto 4, requiere de 1625 r.p.m. para recorrer ≈ 200 m y a 1150 r.p.m. sólo ha recorrido ≈ 145 m. Mientras que el punto 5, al realizar 1150 r.p.m. recorrió ≈ 250 m. Por su parte, el punto 6, no llegó a 1150 r.p.m. y a 950 r.p.m. recorrió ≈ 300 m y para recorrer ≈ 250 m, sólo requiere de 795 r.p.m., figura 8.2.

Con estas observaciones postulamos que “para este caso en particular el desgaste no sólo es función del número de r.p.m., sino también de la distancia de deslizamiento recorrida”, tal y como observaremos en la figura 8.2.

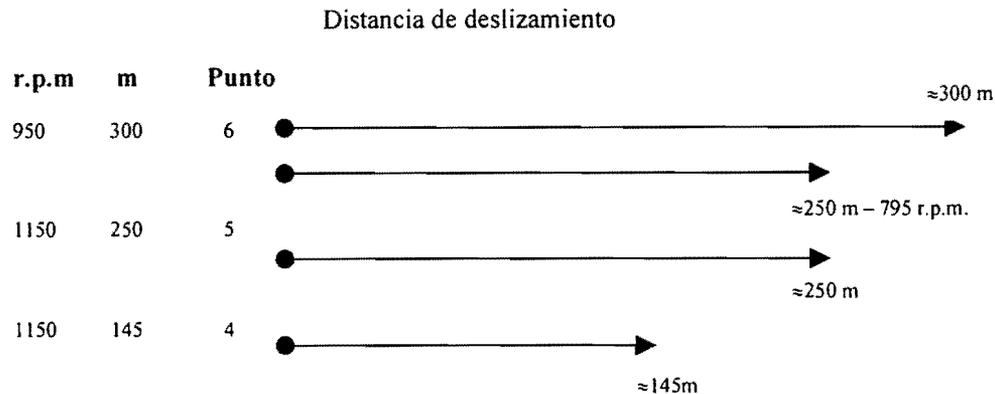


Figura 8.2.- Comparación de r.p.m. realizadas y distancia de deslizamiento, puntos 4,5,6.

De los valores de r.p.m. y distancia de deslizamiento que se presentamos en la figura 8.2, donde consideramos como punto de comparación 1150 r.p.m.; podemos observar que el punto donde se presentó mayor desgaste, punto 5, corresponde tanto al punto de la mayor distancia, como al de más r.p.m. recorridas.

En los gráficos 15 y 16, presentamos el comportamiento de la razón de desgaste respecto al tiempo, correspondiente a cada distancia de deslizamiento evaluada. Observamos, que hay un incremento gradual en la razón de desgaste del primer al tercer punto o distancia de deslizamiento de análisis, de ≈60 m hasta ≈160 m, es decir, la razón de desgaste presentó una pendiente positiva, mientras que para el comportamiento de la razón de desgaste para los últimos 4 puntos, (≈160 m a ≈300 m), observamos lo siguiente: la pendiente va de negativa (puntos 3 a 4), a positiva (puntos 4 a 5) y nuevamente pasa a negativa (puntos 5 a 6). Esto debe ser así, para que el cuarto y sexto puntos o distancias deslizamiento obedezcan el comportamiento cuasi lineal presentado, esto es, la razón de desgaste tiene que disminuir para el cuarto punto y posteriormente volver a un valor de razón de desgaste casi igual al punto 3, para el punto 6. Todo esto excluyendo el punto 5, donde se presentó el mayor desgaste y desde luego un incremento de la razón de desgaste.

Por su parte el coeficiente de desgaste, gráficos 17 y 18, obedeció el comportamiento que observamos en los parámetros de desgaste evaluados hasta el momento, es decir, presentó un decremento gradual en los primeros tres puntos y un pequeño incremento en el cuarto punto, consecuencia del comportamiento lineal del desgaste respecto a la distancia de deslizamiento hasta este cuarto punto. Posteriormente, en el punto 5 se obtiene el mayor coeficiente de desgaste correspondiente al punto o distancia de deslizamiento donde se presentó el mayor desgaste. Finalmente, el coeficiente de desgaste para el punto 6 casi es el mismo que el obtenido en el punto 2, esto debido nuevamente al comportamiento cuasi lineal del desgaste respecto a la distancia de deslizamiento de los puntos 1, 2, 3, 4 y 6. A pesar de que este acero H13, en estado templado y revenido presentó una mayor dureza, el coeficiente de desgaste es mayor y permanece en el rango mínimo (10E-05) indicativo de la presencia de desgaste severo.

Hasta el momento, hemos discutido de manera independiente los resultados obtenidos de las pruebas realizadas al acero H13 en sus 2 diferentes condiciones. Ahora, compararemos los valores obtenidos correspondientes a los parámetros de desgaste evaluados en el acero H13 en sus 2 diferentes condiciones, gráficos 19 y 20, y observamos lo siguiente:

- 1) La presencia de mayor desgaste se desplazó del punto 4, correspondiente a ≈ 200 m (acero H13 en estado recocido), al punto 5, correspondiente a ≈ 250 m (acero H13 en estado templado y revenido), gráfico 19. Consideramos este desplazamiento, no sólo como una mejora al comportamiento en desgaste por distancia de deslizamiento, sino también como una mejora en cuanto a la cantidad de desgaste presentada, ya que comparando ambas condiciones del acero H13, en el estado templado y revenido, el desgaste es menor para todos los puntos, con una diferencia que va desde 25% para el punto de menor variación (punto 5), hasta un incremento de más de 400%, en el punto de mayor diferencia (punto 4).
- 2) En cuanto a la razón de desgaste presentada en las pruebas realizadas, en todos los puntos analizados, es menor en el acero H13 en estado templado y revenido, debido a que esta es directamente proporcional al desgaste presente.
- 3) En el caso del coeficiente de desgaste k , no nos resultó claro definir un patrón de comportamiento general, puesto que al realizar la comparación del comportamiento de k en el acero H13 en sus 2 diferentes condiciones, k es sólo mayor en el acero H13 en estado recocido, en los puntos 1, 2, 5 y 6, y no en todos los puntos.
- 4) Finalmente, al analizar el comportamiento en desgaste respecto a las r.p.m. recorridas, observamos, que para los 3 primeros puntos evaluados del acero H13 en ambas condiciones, se presentó un comportamiento con una tendencia creciente similar en ambos casos, aunque para el acero H13 en estado templado y revenido, la tendencia creciente al desgaste y el desgaste mismo son menores. Por su parte, de los últimos 3 puntos, 4, 5 y 6, observamos que para el acero en H13 en estado recocido, el punto donde se presentó el mayor desgaste, corresponde al punto donde se realizaron mayor número de r.p.m. y para el acero H13 en estado templado y revenido, observamos que tomando como referencia 1150 r.p.m., lo que determina la presencia de mayor desgaste es tanto la mayor distancia de deslizamiento recorrida, como las r.p.m. recorridas.

CAPÍTULO IX.

9.- CONCLUSIONES

El primer objetivo de este trabajo consistió en desarrollar una metodología para un estudio de desgaste, de tal modo que lográramos obtener información útil y confiable. Este objetivo, lo logramos con la metodología utilizada en el desarrollo de este trabajo. La metodología seguida, la consideramos como simple y funcional. Esta consiste, en proponer al principio del presente estudio, Capítulos I, II, III y IV, un manejo de información del tema a un nivel general. De esta forma, logramos que estos capítulos, nos sirvieran como guía y como base para proponer y definir la segunda parte de este trabajo, de tal manera que éste se pudiera ajustar y a su vez satisfacer las necesidades, expectativas y limitaciones que involucraron el desarrollo del mismo; dando lugar a los Capítulos V, VI, VII y VIII. Finalmente, la eficiencia de la metodología utilizada en el desarrollo de este trabajo de tesis se concluye y justifica en este Capítulo IX.

En cuanto a los objetivos 2 y 3 de este trabajo de tesis propuestos en el Capítulo I, hicimos referencia a los factores, parámetros y/o propiedades que determinan el comportamiento en desgaste del acero y tribosistema en consideración, y llegamos a las siguientes conclusiones:

9.1.- Acero H13 en estado recocido.

De los resultados que obtuvimos en los gráficos 6, 7 y 8, respecto al “acondicionamiento de la superficie, cambio de mecanismo de desgaste, superficies propicias del material, etc.”, observamos lo siguiente:

Primeramente, consideramos que de acuerdo a las condiciones de fabricación del material en estudio, obtuvimos un material con matriz blanda y carburos duros (acero H13 en estado recocido). Debido a ello tuvimos un proceso de desgaste por deslizamiento, donde de manera esquemática y a un nivel microscópico, el cuerpo sólido con una superficie pulida comenzaría tal y como observamos en la figura 9.1a.

De acuerdo al comportamiento general del desgaste que observamos, esto trajo como resultado que la matriz blanda por tener menor dureza, se desgastara primero dejando expuestos los carburos duros, figura 9.1 b., Capítulo II y III.

Aquí es donde comienza el cambio de mecanismo de desgaste. Al estar expuestos algunos carburos duros, actúan como protuberancias. Posteriormente, al hacer contacto con la superficie del cuerpo contrario, los carburos tienden a desprenderse, debido a la deformación plástica, natural de una matriz blanda y de la baja cohesión que tienen los carburos con la misma. De esta forma las debris o partículas de desgaste pasan a formar partículas abrasivas, lo que da lugar al cambio de mecanismo de desgaste (abrasión). Esta afirmación, la concluimos al observar de los

gráficos 1, 2, 3, 4, 6 y 7, los puntos evaluados 1, 2, 3 y 4, correspondientes a la etapa inicial del desgaste.

Posteriormente, estas debris o partículas de desgaste tienden a desaparecer por las características del propio tribosistema, dando lugar nuevamente al cambio de mecanismo de desgaste y/o acondicionamiento de la superficie en consideración, figura 9.1c. Dicha afirmación, la concluimos al observar de los gráficos 1, 2, 3, 4, 6 y 7, la etapa final del desgaste correspondiente a los puntos 4, 5 y 6.

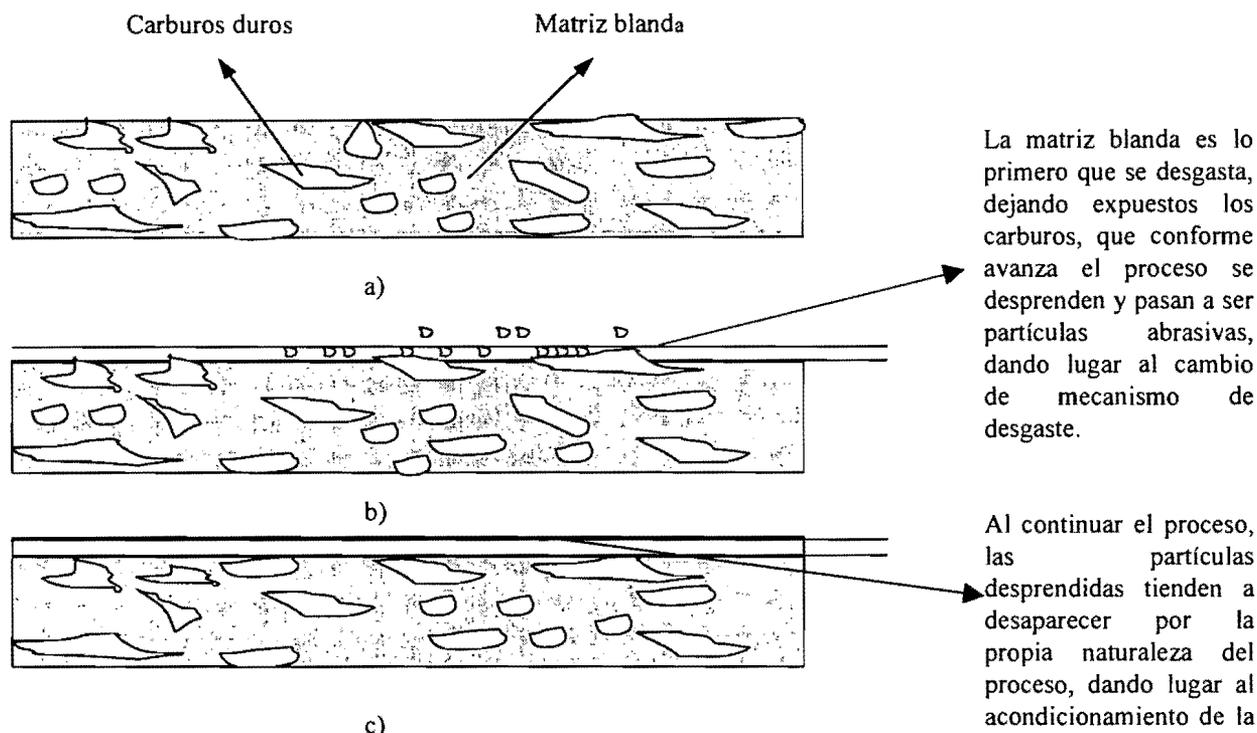


Figura 9.1. Esquema del proceso acondicionamiento de la superficie, debido al desgaste presentado en el acero H13 en estado recocido.

Además de lo anterior, concluimos que para el acero H13 en estado recocido, en este caso y para estas condiciones en particular, lo que determina la presencia de mayor desgaste, es el punto donde se realizaron el mayor número de r.p.m., gráfico 4 y no la distancia de deslizamiento mayor como pudiera esperarse. Esto debido a el número de veces que se repite el paso de un punto del cuerpo sólido, por un mismo punto del cuerpo contrario; motivando así la presencia de mayor desgaste.

9.2.- Acero H13 en estado templado y revenido.

En este caso, consideramos que de acuerdo a las condiciones de fabricación del material en estudio, obtuvimos un material con matriz dura y carburos duros. El cuerpo sólido (acero H13 en estado templado y revenido), de manera esquemática y a nivel microscópico, comenzaría su proceso de desgaste como observamos en la figura 9.2a.

De acuerdo al comportamiento del desgaste que observamos, se presentaron dos situaciones a mencionar:

- Como proceso de desgaste predominante, tenemos que tanto la matriz dura como los carburos duros, se desgastaron a la par, figura 9.2b. Esto lo concluimos por la presencia de menor desgaste debido a la mayor resistencia a la deformación plástica de la matriz y a la mayor cohesión de los carburos presentes: puntos 1, 2, 3, 4 y 5, de los gráficos 10, 11, 12, 13 y 15, correspondientes a la etapa inicial del desgaste y de acondicionamiento de la superficie. De igual modo nos apoyamos del gráfico 16, al observar que la razón de desgaste obtenida en el acero H13 en estado templado y revenido, comparada con la obtenida en el gráfico 7 (acero H13 en estado recocido), disminuyó notablemente.
- Además del proceso de desgaste mencionado en el inciso a), se presentó un proceso de desgaste similar al presentado en el acero H13 en estado recocido, pero a menor escala. Lo anterior se refiere a que debido la presencia de algunos carburos duros en forma de protuberancias, una minoría se desprendió pasando a formar debris o partículas de desgaste abrasivas, dando lugar a un cambio de mecanismo de desgaste (abrasión), figura 9.2b.

Posteriormente, una vez pulida la superficie del cuerpo sólido debido al desgaste de los carburos en forma de protuberancias y además de que las debris o partículas de desgaste desaparecieron por las características del propio tribosistema, nuevamente dieron lugar un cambio de mecanismo de desgaste obteniendo así, el acondicionamiento de la superficie en consideración, figura 9.2c

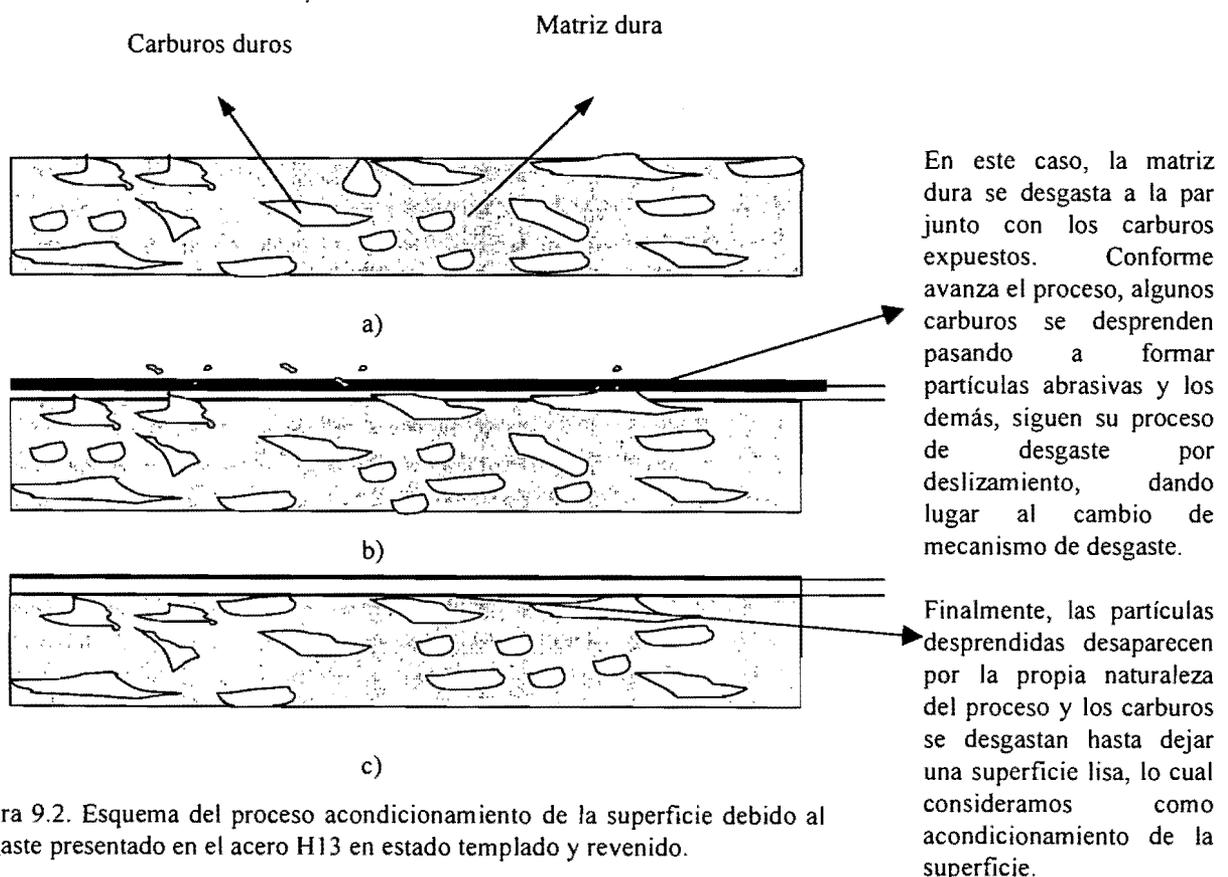


Figura 9.2. Esquema del proceso acondicionamiento de la superficie debido al desgaste presentado en el acero H13 en estado templado y revenido.

También concluimos que para el acero H13 en estado templado y revenido, en este caso en particular, lo que determina la presencia de mayor desgaste, es el punto donde se recorrió la mayor distancia de deslizamiento correspondiente a las r.p.m. de referencia, y no solo debido a las r.p.m. mayores recorridas, tal y como sucedió con el acero H13 en estado recocido.

9.3.- Generales

Con este estudio concluimos que lo que da la pauta en el comportamiento en desgaste evaluado por distancia de deslizamiento, no sólo es la diferencia de durezas, consecuencia de los tratamientos térmicos a los que se sometió el acero H13 en consideración, sino también es consecuencia de las microestructuras obtenidas, lo que dió como resultado propiedades mecánicas y físicas diferentes.

De igual modo, confirmamos la importancia de la influencia de la microestructura en los procesos de desgaste, Capítulo III, ya que como observamos es un factor determinante en el comportamiento en desgaste del acero en consideración, por lo que finalmente concluimos:

- 1) Sería de suma importancia darles un seguimiento a este tipo de estudios, de tal modo que en cada caso en particular, se buscara la microestructura "ideal" del material en estudio, para obtener el mejor comportamiento en desgaste. En este caso, debemos entender por microestructura ideal, a la mejor disposición de las variables que intervienen en la estructura de la misma, como lo son: cantidad, distribución, distancia, cohesión y tamaño de los carburos, nitruros, etc., sobre la matriz de los aceros; de tal manera que como mencionamos, encontráramos la **microestructura optima** para el mejor comportamiento en desgaste del material y tribosistema en consideración.
- 2) Por otra parte, sabemos que en el desarrollo de un **diseño**, la selección de aceros para herramientas, utiliza a la funcionalidad como uno de los criterios primordiales para la selección de un acero. Uno de los factores determinantes de la funcionalidad es su resistencia al desgaste, Capítulo VI. Debido a esto, muchas veces buscamos seleccionar un acero con una alta resistencia al desgaste. Una vez seleccionado y con el objetivo de mejorar sus propiedades físicas y mecánicas, procedemos a someterlo a un tratamiento térmico como lo es: bainitizado, temple, o temple y revenido, etc. Sin embargo, la mayoría de veces nos quedamos en esos términos, sin acercarnos más a una realidad que puede estar en nuestras manos y que consiste primeramente, en comprender no sólo las consecuencias de dichos tratamientos térmicos sobre las propiedades físicas y mecánicas obtenidas, sino también sobre la influencia de la microestructura sobre las propiedades del material en consideración. De esta forma y como ya mencionamos, se podrían mejorar dichas propiedades a través del manejo adecuado de la microestructura de los aceros del tribosistema de estudio, dando como resultado una **máxima funcionalidad** del mismo y por consiguiente una **excelente calidad** en la selección de material para el **diseño** propuesto.

APÉNDICE

A.- Función Probabilística Acumulativa $\phi I(Z)$.

Una función probabilística acumulativa de distribución, se obtienen a partir de la función de densidad generada mediante el análisis de los datos obtenidos de los eventos en los que se involucra la variable aleatoria en consideración. Las variables pueden ser del tipo discreto o continuo según sea el caso [1], [2]. En el presente estudio la variable aleatoria en consideración, es la distribución de las alturas de las asperezas de la superficie de un cuerpo sometido a desgaste en un tiempo determinado t_i . En la figura 10.1, se describe el comportamiento de la función probabilística acumulativa dependiente del tiempo $\phi_i(z)$.

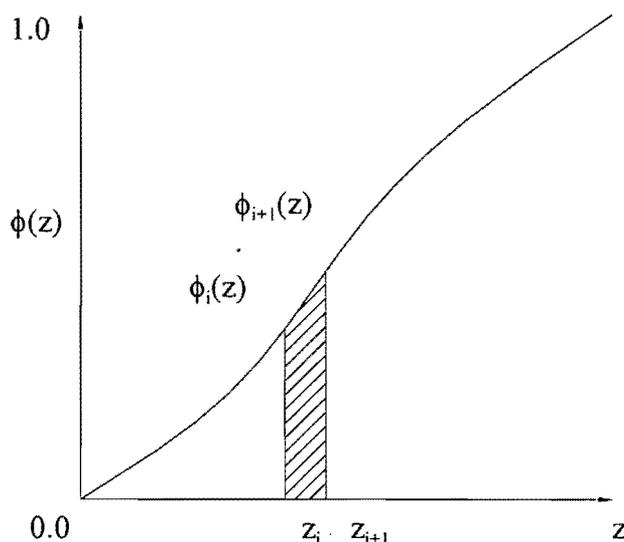


Figura 10.1.- Comportamiento de la función probabilística acumulativa de distribución.

La ecuación (3) del capítulo II, determina la variación del volumen del material dentro del intervalo de tiempo prescrito entre t_i y t_{i+1} , el cual puede ser minutos o segundos e involucran la función probabilística acumulativa de distribución $\phi_i(z)$. Para la deducción de la ecuación se debe de hacer referencia a la definición de media, esperanza o valor esperado.

La media de una variable aleatoria X , se denota por μ_x o $E[X]$, y esta dada por:

- i) $E[X] = \sum x_j f_x(x)$, para X del tipo discreto para $x_1, x_2, x_3, \dots, x_j, \dots$
- ii) $E[X] = \int_{-\infty}^{\infty} x f_x(x) dx$, si X es del tipo continuo con función de densidad de probabilidad $f_x(x)$.
- iii) $E[X] = \int_0^{\infty} [1 - F_x(x)] dx - \int_{-\infty}^0 F_x(x) dx$, para una variable aleatoria arbitraria X .

En estas tres situaciones de análisis se manejan tanto funciones de densidad de probabilidad (i, ii), como de distribución acumulativas (iii). En estos casos la definición de media esta haciendo referencia a la media de una función de densidad probabilística, a la media de una función probabilística de distribución o a la media de una variable aleatoria arbitraria.

Puesto que en el presente estudio, lo que se propone como dato es la función probabilística acumulativa dependiente del tiempo $\phi_i(z)$, lo que se determina es un valor esperado de la variación de las alturas respecto al tiempo, este último juega el papel de variable arbitraria.

De la figura 10.1, se observa:

$$Z_i < Z_{i+1} \quad \dots 10.1$$

haciendo $F_x(x) = \phi_i(z)$:

$$\phi_i(z) = P(i=Z) \quad \dots 10.2$$

y aplicando (iii) se tiene:

$$Z_i = E[X] = \int_0^{\infty} [1 - \phi_i(z)] dz - \int_{-\infty}^0 \phi_i(z) dz \quad \dots 10.3$$

el segundo elemento de la ecuación se hace cero y se tiene:

$$Z_i = E[X] = \int_0^{\infty} dz - \int_0^{\infty} \phi_i(z) dz \quad \dots 10.4$$

$$Z_{i+1} = E[X] = \int_0^{\infty} dz - \int_0^{\infty} \phi_{i+1}(z) dz \quad \dots 10.4a$$

considerando que el volumen esta dado por $V = A \times h$, donde en este caso el área A es el área de contacto aparente y se considera como constante; la altura h está dada por $\phi(z)$ y la diferencia de volumen debe cumplir la siguiente condición:

$$V_i - V_{i+1} > 0 \quad \dots 10.5$$

Sustituyendo (10.4) y (10.4a) en (10.1):

$$\int_0^{\infty} dz - \int_0^{\infty} \phi_i(z) dz < \int_0^{\infty} dz - \int_0^{\infty} \phi_{i+1}(z) dz \quad \dots 10.6$$

Considerando el efecto de la igualdad (10.6) queda:

$$\int_0^{\infty} \phi_i(z) dz > \int_0^{\infty} \phi_{i+1}(z) dz \quad \dots 10.7$$

Sustituyendo (10.7) en (10.5) se obtiene la ecuación (2.3) planteada en el capítulo II, para la obtención del desgaste :

$$V_i - V_{i+1} = A \left[\int_0^{\infty} \phi_i(z) dz > \int_0^{\infty} \phi_{i+1}(z) dz \right] > 0$$

$$V_i - V_{i+1} = A \left[\int_0^{\infty} \phi_i(z) dz - \int_0^{\infty} \phi_{i+1}(z) dz \right] \quad \dots 10.8$$

donde que (10.8) era lo que se quería demostrar.

B.- MODELO FÍSICO.

En esta parte del apéndice se fundamentan algunos conceptos que intervienen en el modelo físico presentado en el capítulo II, con el objetivo de tener una mejor comprensión del mismo.

B.1.- Flujo resistivo $\delta_i(x,y,z)$.

El flujo resistivo $\delta_i(x,y,z)$, representa la capacidad del material para resistir el flujo plástico en un punto (x,y,z) en un tiempo t_i . Esta es una propiedad microscópica del material y puede ser relacionada con la microdureza o con la resistencia a la cedencia del mismo[3].

B.2.- Esfuerzo cortante $\tau_i(x,y,x)$.

Puesto que la distribución de los esfuerzos cortantes depende del coeficiente de fricción, la fuerza cortante promedio será función de la fuerza friccionante. Para este modelo en particular el efecto del coeficiente de fricción se considera más significativo que el efecto de la concentración de esfuerzos.

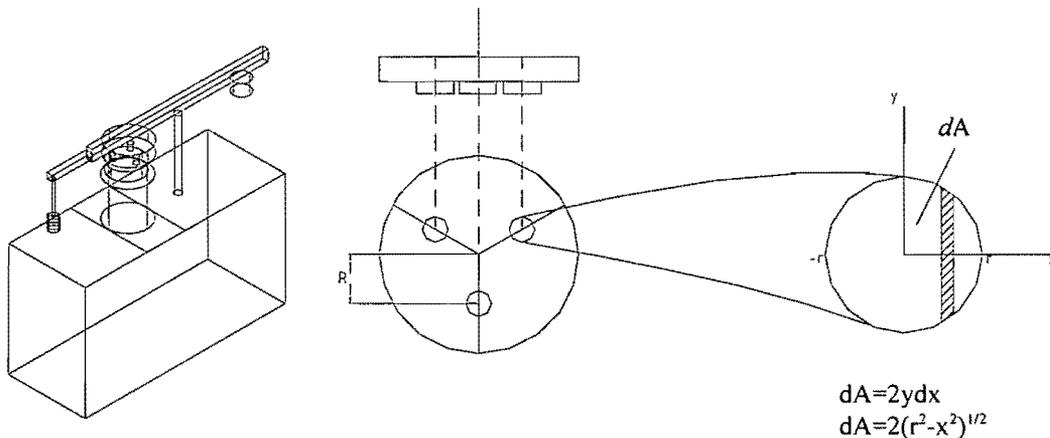


Figura 10.2.- Sistema del equipo de análisis.

Para la obtención del esfuerzo cortante $\tau_i(x,y,x)$ del sistema de análisis propuesto, figura 10.2, se requiere conocer la fuerza friccionante cortante y para la obtención de la fuerza friccionante se requiere del coeficiente de fricción[4], [5]. Para ello se procede de la siguiente manera:

Se tiene aplicada una fuerza normal N , la cual se distribuye en las tres probetas de la siguiente manera:

$$dN = 3 \left[\frac{P_i}{A_i} \right] dA \quad \dots 10.9$$

$$dN = 3 \left[\frac{P_i}{A_i} \right] 2(r^2 - x^2)^{1/2}$$

$$dN = 6 \left[\frac{P_i}{A_i} \right] (r^2 - x^2)^{1/2} dx \quad \dots 10.9a$$

Para obtener la distribución de la fuerza normal sobre la superficie de las probetas, se integra (10.9a):

$$\int dN = 6 \left[\frac{P_i}{A_i} \right] \int_{-r}^r (r^2 - x^2)^{1/2} dx \quad \dots 10.10$$

$$N = 6 \left[\frac{P_i}{A} \right] \left[\frac{x(r^2 - x^2)^{1/2}}{2} + \frac{r^2}{2} \text{sen}^{-1} \frac{x}{r} \right]_{-r}^r \quad \dots 10.11$$

$$N = 3 \left[\frac{P_i}{A_i} \right] \pi r^2$$

$$N = 3P \quad \dots 10.12$$

(10.10) representa la variación de la carga sobre la superficie de las probetas, y (10.12) refleja que la carga N sobre las tres probetas, está dada por el producto de los tres componentes de fuerzas P_i aplicados sobre las probetas.

Una vez que se cuenta con el efecto de la carga normal N sobre las probetas, se procede a la obtención de la fuerza friccionante, la cual se define por:

$$F = \mu N \quad \dots 10.12$$

Diferenciando e integrando (10.12) para obtener la fuerza friccionante generada sobre la superficie de las probetas:

$$dF = \mu dN \quad \dots 10.13$$

$$\int dF = 6\mu \left[\frac{P_i}{A_i} \right] \int_{-r}^r (r^2 - x^2)^{1/2} dx$$

$$F = 3\mu \left[\frac{P_i}{A_i} \right] \pi r^2$$

$$F_i = 3\mu P_i \quad \dots 10.14$$

$$F = 3\mu F_i \quad \dots 10.15$$

(10.14) representa la variación de la fuerza friccionante F_i generada por la carga normal P_i sobre las probetas y (10.15) refleja que la fuerza friccionante total F , está dada por el producto de la fuerza friccionante F_i que actúa sobre las probetas.

Se tienen las F_i y las P_i por lo que se procede a la obtención del torque, el cual se define por:

$$T = Fd \quad \dots 10.16$$

Diferenciando e integrando (10.16) para obtener el torque generado sobre la superficie de las probetas:

$$dT = \mu dN(R-x) \quad \dots 10.17$$

$$dT = 6\mu \left[\frac{P_i}{A_i} \right] (r^2-x^2)^{1/2} (R-x) dx$$

$$\int dT = 6\mu \left[\frac{P_i}{A_i} \right] \int_r (r^2-x^2)^{1/2} (R-x) dx \quad \dots 10.18$$

$$T = 6\mu \left[\frac{P_i}{A_i} \right] \left[\frac{\pi r^2 R}{2} \right]$$

$$T = 3\mu \left[\frac{P_i}{A_i} \right] [\pi r^2 R] \quad \dots 10.19$$

El torque total esta dado por la ecuación (10.19) y solo falta conocer el coeficiente de fricción, el cual se obtiene por:

$$\mu = \frac{T 2 A_i}{3 P_i \pi r^2 R} \quad \dots 10.20$$

Con esto se tienen los datos necesarios (T , μ , A , P , r , R y F) para la obtención del esfuerzo cortante $\tau_i(x,y,x)$ generado por la fuerza friccionante F , el cual está dado por:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad \dots 10.21$$

La ecuación (10.21) involucra a las fuerzas friccionante F_f , y estas a su vez a las fuerzas normales P_f , por lo que el análisis esta completo.

C.- Determinación del perfil de esfuerzos y de resistencia.

Durante un proceso de desgaste, las superficies en contacto están sujetas a pérdida de material, debido al movimiento relativo. Al mismo tiempo las fuerzas aplicadas al tribosistema son transmitidas a la subsuperficie, lo que da lugar a la formación de un perfil de esfuerzos de superficie a centro. Aparentemente la deformación cortante o la fractura se inicia cuando el esfuerzo local excede la resistencia local (agente desgastante y agente antidesgaste respectivamente), es decir $S_a > S_o$, donde S_a es el esfuerzo y la S_o resistencia.

C.1- Perfiles de resistencia (flujo resistivo).

Este es una de las variables difíciles de obtener, puesto que si se utiliza una prueba convencional como podría ser la prueba de flexión o tensión, se está considerando todo el espécimen y no la parte de interés que sólo es la profundidad de análisis, h . Debido a esto se recomienda que el perfil de esfuerzos se obtenga a partir de el perfil de durezas del material, puesto que la dureza es uno de los parámetros que se puede medir localmente, además de que la dureza sin importar la geometría del espécimen en estudio presenta un perfil de durezas no homogéneo, figura 10.3.

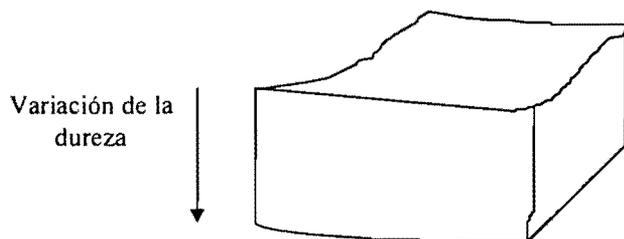


Figura 10.3.- Perfil de dureza no homogéneo.

Con el fin de aplicar este criterio hay que convertir la dureza medida (perfiles de H_v), en perfiles de resistencia a la cedencia (flujo resistivo δ). De acuerdo a Tabor[6] y Cahoon[7], existe una relación lineal entre la resistencia a la cedencia Y del material y su dureza H_v , que representa la resistencia a la deformación (o flujo resistivo δ).

$$Y = H_v / B \quad \dots 10.22$$

B = Es una constante que se determina a partir del coeficiente de endurecimiento por deformación del material.

Para materiales que no endurecen por este mecanismo (como los aceros para trabajo en frío) $B \cong 3$, mientras que para materiales cerámicos $B < 3$, y para materiales que endurecen por deformación B varía entre 5 y 9.

C.2.- Perfiles de esfuerzos(τ).

Bajo condiciones de contacto elástico, el campo de esfuerzos se puede obtener a partir de las fuerzas aplicadas, las propiedades elásticas del material y la geometría de los cuerpos. Consideremos dos cuerpos con movimiento relativo, con una tracción tangencial bajo una carga aplicada P , figura 10.4

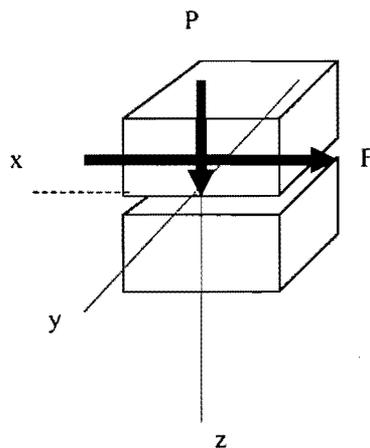


Figura 10.4.- Arreglo del sistema de contacto.

La distribución de la presión sobre la superficie se puede obtener a partir de la teoría de Hertz para contacto elástico[8]. Debido a deslizamiento mutuo de los cuerpos, sobre la superficie se origina una fuerza cortante F . De acuerdo con la teoría de elasticidad, los esfuerzos totales en cualesquier punto se pueden derivar al calcular los componentes de la fuerza normal y la fuerza tangencial independientemente, y posteriormente superponiéndolos:

$$\sigma_x = \sigma_{nx} + \sigma_{tx} \quad \dots 10.23$$

$$\sigma_z = \sigma_{nz} + \sigma_{tz} \quad \dots 10.24$$

$$\tau_{xz} = \tau_{nxz} + \tau_{txz} \quad \dots 10.25$$

Donde σ_x , σ_z , y τ_{xz} , son los componentes debido a la fuerza normal y σ_{tx} , σ_{tz} y τ_{txz} son los componentes debido a la fuerza tangencial. Para simplificar el cálculo es recomendable considerar el caso de esfuerzos planos[9], σ_y , τ_{yx} , $\tau_{yx} = 0$, así los componentes de esfuerzo debido a la fuerza normal, se pueden calcular por la teoría de contacto elástico de Hertz y los componentes debido a la fuerza tangencial se pueden calcular acorde a lo propuesto por Smith y Liu[10]. Los esfuerzos principales σ_1 y σ_3 , y de ahí el esfuerzo máximo se pueden obtener por:

$$\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \quad \dots 10.26$$

0

$$\tau_{\max} = \{[(\sigma_z - \sigma_x)/2]^2 + \tau_{xz}^2\}^{1/2} \quad \dots 10.27$$

para esto, los valores τ_{\max} , de cada profundidad son graficados contra la profundidad desde la superficie de contacto, y así se obtiene la plantilla o perfil del cortante máximo. En el caso de que se desprecien los esfuerzos residuales, el modulo elástico se considerará el mismo en todo el cuerpo[11].

Los esfuerzos residuales se presentan en el plano x-z, paralelo a la dirección x(dirección tangencial). En la dirección radial los esfuerzos residuales casi son despreciables[9],[11]. Para deslizamiento puro($F = 0$), sobre el eje de simetría($x = 0$), τ_{xz} . Así σ_x y σ_z (sobre $x = 0$), son los esfuerzos principales directos (σ_1 y σ_3 respectivamente). De (10.25)obtenemos:

$$\tau'_{\max} = [\sigma_z - (\sigma_x - \sigma_r)]/2 = (\sigma_z - \sigma_r)/2 - \sigma_r/2 \quad \dots 10.28$$

$$\tau'_{\max} = \tau_{\max} - \sigma_r/2 \quad \dots 10.29$$

donde σ_r son los esfuerzos residuales, τ_{\max} es el esfuerzo cortante máximo debido solamente a la fuerza cortante, y τ'_{\max} es el esfuerzo cortante debido a la fuerza normal y a los esfuerzos residuales. Un modelo similar se ha desarrollado por Knight, para la respuesta a la indentación de aceros con recubrimientos. Cuando una fuerza friccionante es superpuesta sobre la región de contacto, el rol de los esfuerzos residuales no es tan importante, puesto que σ_1 y σ_3 no son los esfuerzos principales directos. De la ecuación (10.26) se obtiene:

$$\tau'_{\max} = \{[(\sigma_z - (\sigma_x + \sigma_r))/2]^2 + \tau_{xz}^2\}^{1/2} \quad \dots 10.30$$

Se debe de hacer notar que los esfuerzos residuales σ_r no tienen influencia sobre τ_{xz} (aunque siendo estrictos, desde luego que si la tiene a 45°). Con esto claramente se ve que la ecuación (10.29) es una forma especial (10.30).

D.- PRUEBA ESPIGA SOBRE DISCO

Dentro de esta prueba existen un sin número de geométricas para la espiga de estudio, sin embargo, a manera ilustrativa se presenta la siguiente deducción de fórmula que determine la variación de volumen para una espiga con punta esférica y para el disco.

Ecuaciones exactas para determinar la pérdida de volumen en:

D.1.- Espiga con punta esférica:

$$\text{pérdida de volumen} = (\pi h/6)[3d^2/4+h^2]$$

donde:

$$h.- r - [r^2 - d^2/4]^{1/2}$$

d.- diámetro de la marca de desgaste, y

r.- radio de la punta de la espiga.

Considerando que no existe desgaste significativo en el disco.

D.2.- Un disco:

$$\text{pérdida de volumen} = 2\pi R[r^2 \sin^{-1}(d/2r) - (d/4)(4r^2 - d^2)^{1/2}]$$

donde:

R = Radio de la trayectoria de desgaste, y

d = espesor de la trayectoria de desgaste,

r = radio de la punta de la espiga.

Considerando que no existe desgaste significativo en la espiga[12].

Referencias.

- [1] F. Mosteller, G.B. Thomas
Probabilistic and Statatistis
Addison-Wesley Publishing Company, E.U. 1967.
- [2] R.V. Hohgg, E.A. Tams
Probability and Statatistical inference.
Maxwell Macmillan International Edition, 3Ed., N.J., 1983
- [3] J.Y. Lin, H.S. Cheng
"An analytical Model for Wear"
Revista "Transaction of the ASME", Vol III 1989
- [4] I.H. Shames
Engineering Mechanics, Static and Dynamics.
Prentice Hall, 4ed., N.J. 1997
- [5] B.I. Sandor
Engineering Mechanics, Static and Dynamics.
Prentice Hall, 2ed., N.J. 1987
- [6] D. Tabor
Revista "J.Inst.Met."
E.U. 1951
- [7] J.R. Cahoon, W.H. Broughton, and A.R. Kkutzar
"Metall"
Revista "transaction", IIa (2), 1980.
- [8] K - H. Zum Gahr
Microestructure and wear of materials.

- Elsevier, 1987.
- [9] J.M.Dally, W.F. Riley
Experimental Stress Analysis
McGraw-Hill, 3ed., 1991.
- [10] J.O. Smith, and C.K. Liu
Revista "Journal of applied mechanics, Trans, ASME"
E.U. 1953.
- [11] Handbook of engineering mechanics
Edit. W. Flugge,
N.Y. McGraw-Hill, 1962:
- [12] ASTM Standars
E.U., 1990