

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**ESTUDIO DE DESGASTE TIPO ESPIGA SOBRE DISCO,
UTILIZANDO UN AISI 1020 CEMENTADO Y UN ACERO O1**

PRESENTADO POR:

GONZALO RAFAEL GARCÍA RAMÍREZ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, DICIEMBRE DE 2017

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

M.Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL :

M.Sc. CRISTÓBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR :

ING. RIGOBERTO VELÁSQUEZ PAZ

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO MECÁNICO

Título :

**ESTUDIO DE DESGASTE TIPO ESPIGA SOBRE DISCO,
UTILIZANDO UN AISI 1020 CEMENTADO Y UN ACERO O1**

Presentado por :

GONZALO RAFAEL GARCÍA RAMÍREZ

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

San Salvador, diciembre de 2017

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

DEDICATORIA

Este trabajo de graduación está dedicado a:

Mis padres:

Gladys y Gonzalo.

Mi abuela:

Gladys.

Y en memoria de mi abuela y mis abuelos:

“Mama” Haydée, “papa” Chalo y a mi abuelo Jesús.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente agradezco a mis padres, hermana y familia por toda la paciencia y el apoyo incondicional que me han dado en estos años de estudio y a la familia Huezco Sánchez por ser mi segunda familia.

También, agradezco a todas las personas que directa o indirectamente colaboraron con el desarrollo de este trabajo de graduación. Comenzando con mi asesor, Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz por la guía, el apoyo y la confianza; al personal de la Unidad Productiva Metal Mecánica de esta Escuela, en especial al Sr. Julio Quintanilla, por su importante apoyo durante el proceso de maquinado; a Melvin y Nájera por apoyarme en diferentes actividades del presente trabajo; al Dr. Marvin Núñez y a los licenciados Morena Martínez y Ulises Castillo de la Facultad de Química y Farmacia por su apoyo en el préstamo y manipulación de la balanza analítica; también agradezco a Edgardo Cárcamo y a Luis Parada por su apoyo en los momentos importantes dentro de esta investigación.

Al Centro de Investigación Científica de la Universidad de El Salvador (CIC-UES), por el financiamiento otorgado para poder llevar a cabo nuestro trabajo de graduación.

Al M.Sc. y Lic. Guillermo Mejía Díaz de la Escuela de Ingeniería de Sistemas Informáticos, por el préstamo de la cámara Mimio View patrocinada por la *Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo* (AECID).

A todos los profesores e instructores que aportaron a mi formación académica.

A mis amigos Josué, Ernesto, Gerardo y Fernando por haber compartido todos estos años de estudio, también a los que estuvieron pendientes de este proceso como Carlos Villegas, Adela, Melissa, Celeste, Karla, Vilma, Wilfredo, Karen, Rina, Astrid, Oscar, Giovanni, Tatiana, Enrique, Samuel, Samuel Romero, Nelson, Eliseo, Josué Alexander y por último, pero no menos importante, a Natalia, quien me ha escuchado o leído durante todos estos meses.

Agradezco a la ASEIM, que me ayudó a desarrollarme en diferentes ámbitos durante todos estos años y donde conocí personas que me brindaron su ayuda desinteresada.

Sin dejar de agradecer a Dios, por ser la fuerza que me mueve en todo momento y por las bendiciones que ha derramado sobre mi vida.

ESTUDIO DE DESGASTE TIPO ESPIGA SOBRE DISCO, UTILIZANDO UN AISI 1020 CEMENTADO Y UN ACERO O1

Estudiante: Br. Gonzalo Rafael García Ramírez¹

Docente asesor: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz²

Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura,
Universidad de El Salvador

RESUMEN

Se ha realizado una investigación sobre desgaste por medio de la ejecución de ensayos tipo espiga sobre disco, se han utilizado discos de acero AISI 1020 cementados por medio de carburante sólido a 900°C y con post-tratamiento térmico de temple y revenido, las espigas se fabricaron de un acero AISI O1 con tratamiento térmico de temple y revenido. Los ensayos se realizaron bajo diferentes combinaciones de condición de material, carga y distancia de deslizamiento, obteniendo de esta forma 12 condiciones diferentes, para cada condición se realizaron 3 experimentos. Se realizó medición de la dureza y del espesor de la capa cementada. Se obtuvo un incremento del desgaste de los discos a medida se incrementaba la carga y la distancia de deslizamiento y de la misma forma, los especímenes cementados presentaron menor desgaste que los especímenes de material base, esto debido a la mayor dureza presentada por los especímenes cementados.

1 E-mail: gonzalogarcia1293@hotmail.com

2 E-mail: jaberriosortiz@gmail.com

PIN-ON-DISC WEAR STUDY, USING A CASE-HARDENED AISI 1020 AND AN O1 STEEL

Student: Br. Gonzalo Rafael García Ramírez¹

Advisor Professor: Dr. & M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz²

Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura,
Universidad de El Salvador

ABSTRACT

An investigation about wear has been carried out by using pin-on-disc tests, case-hardened AISI 1020 discs by pack carburizing at 900 °C have been used, applying to them a quenching and tempering post heat treatment. The pins have been made of AISI O1, applying to them a quenching and tempering heat treatment. The tests were carried out under different combinations of parameters such as material condition, load and sliding distance, obtaining 12 different combinations and 3 tests for each one of them. Also hardness and thickness measurement of the case was carried out. It was obtained an increase of wear due to the increase of the load and the sliding distance and at the same time the case-hardened specimens proved to have a lower rate of wear than the ones with no thermochemical treatment due to the higher hardness of the first ones.

1 E-mail: gonzalogarcia1293@hotmail.com

2 E-mail: jaberriosortiz@gmail.com

CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1. Desgaste.....	3
1.1.1. Tipos de desgaste	4
1.1.2. Topografía de las superficies	6
1.1.3. Contacto de sólidos.....	10
1.1.4. Fricción.....	13
1.1.5. Teoría molecular de la fricción y del desgaste	16
1.1.6. Desgaste por fricción.....	18
1.1.7. Desgaste por adherencia	19
1.1.8. Transferencia de metales durante el desgaste	24
1.1.9. Efecto de la temperatura y la velocidad	26
1.1.10. Efecto de la carga y la distancia de deslizamiento	31
1.2. Estudios de desgaste.....	33
1.2.1. Tipos de máquinas para realizar ensayos de desgaste	33
1.2.2. Normas ASTM para ensayos de desgaste.....	36
1.2.3. Ensayo tipo espiga sobre disco.....	37
1.3. Tratamiento termoquímico de cementación.....	39
1.3.1. Cementación del acero	40
1.3.2. Cementación con carburantes sólidos	42
1.3.3. Ejecución de la cementación con carburantes sólidos	48
2. DISEÑO EXPERIMENTAL	50
2.1. Diagrama de flujo de la metodología experimental.....	50
2.2. Dimensionamiento de los discos y espigas para los ensayos de desgaste	52
2.3. Maquinado de las probetas.....	53
2.4. Diseño de la caja para cementación.....	54
2.5. Tratamiento termoquímico de cementación.....	56

2.5.1.	Limpieza de probetas	58
2.5.2.	Preparación de la mezcla carburante	58
2.5.3.	Distribución de probetas dentro de la caja	58
2.5.4.	Tratamiento termoquímico de cementación de las probetas	59
2.5.5.	Etapa posterior del proceso de cementación	59
2.6.	Post tratamiento térmico	59
2.7.	Tratamiento térmico de las espigas	62
2.8.	Preparación previa al ensayo de desgaste tipo espiga sobre disco	63
2.9.	Ensayo de desgaste tipo espiga sobre disco	65
2.10.	Determinación de dureza	70
2.11.	Medición del espesor de la capa cementada	72
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	76
3.1.	Determinación de dureza Rockwell C	76
3.2.	Medición del espesor de la capa cementada	77
3.3.	Resultados de los ensayos de desgaste.....	78
3.4.	Análisis de resultados	87
3.4.1.	Análisis estadístico de desgaste	87
3.4.2.	Análisis del coeficiente de fricción.....	91
	CONCLUSIONES	93
	RECOMENDACIONES	94
	REFERENCIAS	95

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Característica para los especímenes para los ensayos de desgaste.....	38
Tabla 1.2. Resultados de los ensayos de desgaste.....	39
Tabla 1.3. Contenidos de CO y CO ₂ en la fase gaseosa, en función de la temperatura con un cementante sólido (sin considerar la cementación del acero).....	43
Tabla 1.4. Condición de equilibrio entre CO y CO ₂ y el contenido de carbono superficial del acero a dos temperaturas diferentes.....	43
Tabla 2.1. Composición química de los aceros a estudiar en condiciones de entrega.....	53
Tabla 2.2. Espesores de capa cementada para diferentes mezclas y distancias de separación entre probetas (Artiga, Hernández, & Mezquita, 2002).....	56
Tabla 2.3. Condiciones y variables bajo las que se realizan los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco.....	68
Tabla 3.1. Medición de dureza Rockwell C.....	76
Tabla 3.2. Valores de desgaste para los discos cementados y no cementados.	79
Tabla 3.3. Valores de desgaste para la espiga.	80
Tabla 3.4. Análisis estadístico del desgaste de los discos medido por su diferencia de peso.	88
Tabla 3.5. Análisis estadístico del desgaste de la espiga medido por su diferencia de peso.	89
Tabla 3.6. Constante de proporcionalidad para cada condición de carga, tanto para los discos cementados como no cementados.....	90
Tabla 3.7. Valores promedio del coeficiente de fricción entre discos de acero AISI 1020 cementados y un pin de acero AISI O1.....	92

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1. Diferentes tipos de asperezas de una superficie que presenta la misma altura entre cresta y valles, pero diferentes longitudes de onda: (a) Superficie lisa, (b) Superficie lisa pero no plana de longitud de onda macrogeométrica, (c) Superficie plana rugosa, (d) Superficie plana rugosa, y (e) Superficie plana rugosa de longitud microgeométrica (Sarkar, 1990).....	7
Fig. 1.2. Principios de un medidor: (a) Esquema del conjunto estilete y armadura; y (b) Esquema del circuito eléctrico del cual se obtiene el trazo de la superficie (Sarkar, 1990).....	8
Fig. 1.3. Asperezas superficiales. R_t es la altura máxima entre crestas y valles (Sarkar, 1990).....	8
Fig. 1.4. Pendiente de las asperezas de una superficie erosionada según (Halliday, 1955).....	9
Fig. 1.5. Cuerpo hemisférico que presiona sobre una superficie plana (Sarkar, 1990).....	11
Fig. 1.6. Esfera con microasperezas (Sarkar, 1990).....	12
Fig. 1.7. Superficie rugosa idealizada penetrada por una superficie plana (Sarkar, 1990).....	12
Fig. 1.8. Una superficie real penetrada por una superficie plana (Sarkar, 1990).....	13
Fig. 1.9. Una espiga hemisférica se desliza sobre una superficie suave bajo la acción de una carga: (a) Espiga estacionaria; y (b) Espiga en movimiento, produciendo una huella en forma de ranura (Sarkar, 1990).....	14
Fig. 1.10. Curva característica de desgaste contra distancia de deslizamiento (Sarkar, 1990).....	18
Fig. 1.11. Razón de desgaste en función de la presión de contacto aparente (Sarkar, 1990).....	21
Fig. 1.12. Variación entre el tiempo de desgaste y la transferencia de metal de una espiga de latón que se desliza sobre un anillo de estelita (Sarkar, 1990).....	25
Fig. 1.13. Variación de la razón del desgaste con la temperatura para un latón (60/40), sobre acero para herramientas (Sarkar, 1990).....	28
Fig. 1.14. Gráfica de la razón de desgaste en relación con el recíproco de la dureza (Sarkar, 1990).....	29
Fig. 1.15. Variación de la razón de desgaste y la transferencia de metal con la velocidad. Carga 22.5 kg (Sarkar, 1990).....	30
Fig. 1.16. Variación de la razón de desgaste y la temperatura superficial con velocidad para espigas aisladas térmicamente y enfriadas. Carga 3 kg (Sarkar, 1990).....	31

Fig. 1.17. Desgaste del acero vs. acero a 100 kg/cm ² y con lubricante líquido parafínico (Sarkar, 1990).....	32
Fig. 1.18. Máquina de espiga sobre mesa oscilante (Sarkar, 1990).....	33
Fig. 1.19. Máquina de espiga sobre buje (Sarkar, 1990).....	34
Fig. 1.20. Máquina de cilindros cruzados (Sarkar, 1990).....	34
Fig. 1.21. Máquina de espiga sobre cilindro (Sarkar, 1990).....	35
Fig. 1.22. Máquina de espiga sobre disco (Sarkar, 1990).....	36
Fig. 1.23. Relación entre el contenido de CO de la atmósfera carburante, la temperatura y contenido de carbono del acero.....	45
Fig. 1.24. Efecto de la temperatura y del tiempo de permanencia sobre la profundidad de cementación con carburante sólido (Carbón + 40% de BaCO ₃).....	49
Fig. 2.1. Diagrama de flujo de la metodología experimental.....	51
Fig. 2.2. Dimensiones de los especímenes a utilizar en el ensayo tipo espiga sobre disco. Cotas en mm.....	52
Fig. 2.3. Torno convencional COMEC, TG 180 N.....	53
Fig. 2.4. Sierra industrial.....	54
Fig. 2.5. Vista en planta de la caja de cementación. Cotas en mm.....	55
Fig. 2.6. Dimensiones externas de la caja y su tapadera. Cotas en mm.....	56
Fig. 2.7. Gráfica de los diferentes espesores de capa cementada para determinado tipo de mezcla y distancia de separación entre probetas para un tratamiento de 8 horas.....	57
Fig. 2.8. Curva de variación temperatura-tiempo para el post tratamiento térmico de temple y revenido para los discos cementados.....	60
Fig. 2.9. Cámara de gas inerte durante el post tratamiento térmico de los discos cementados.....	61
Fig. 2.10. Curva de variación temperatura-tiempo para el tratamiento térmico de temple y revenido de las espigas de acero AISI O1.....	62
Fig. 2.11. Disco de acero AISI 1020 tras el proceso de lijado.....	64
Fig. 2.12. Módulo para ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco marca GUNT, TM 260.3.....	65
Fig. 2.13. Módulo para ensayos tipo espiga sobre disco con sus principales componentes señalados.....	66
Fig. 2.14. Balanza analítica marca Ohaus.....	67
Fig. 2.15. Campana de vacío.....	67
Fig. 2.16. Durómetro marca RAMS.....	71
Fig. 2.17. Penetrador de diamante de geometría cónica utilizado para la escala de dureza Rockwell C.....	71
Fig. 2.18. Posicionamiento de la probeta durante la medición de dureza.....	72

Fig. 2.19. Corte de la muestra metalográfica a preparar para la medición del espesor de la capa cementada. A es un detalle de la muestra.....	73
Fig. 2.20. Pulidora marca Presi.....	74
Fig. 2.21. Microscopio óptico.....	74
Fig. 2.22. Equipo utilizado para la medición del espesor de la capa cementada.....	75
Fig. 3.1. Secuencia fotográfica de la capa cementada.....	77
Fig. 3.2. Medición del espesor de la capa cementada.....	77
Fig. 3.3. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero AISI 1020 sin cementar y una espiga de acero AISI O1, con carga de 5 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.....	81
Fig. 3.4. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero AISI 1020 sin cementar y una espiga de acero AISI O1, con carga de 10 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.....	81
Fig. 3.5. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero AISI 1020 sin cementar y una espiga de acero AISI O1, con carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.....	82
Fig. 3.6. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero AISI 1020 sin cementar y una espiga de acero AISI O1, con carga de 5 N y distancia de deslizamiento de 1500 m.....	82
Fig. 3.7. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero AISI 1020 sin cementar y una espiga de acero AISI O1, con carga de 10 N y distancia de deslizamiento de 1500 m.....	83
Fig. 3.8. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero AISI 1020 sin cementar y una espiga de acero AISI O1, con carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 1500 m.....	83
Fig. 3.9. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero AISI 1020 cementados y una espiga de acero AISI O1, con carga de 5 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.....	84
Fig. 3.10. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero AISI 1020 cementados y una espiga de acero AISI O1, con carga de 10 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.....	84
Fig. 3.11. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero AISI 1020 cementados y una espiga de acero AISI O1, con carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.....	85

Fig. 3.12. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero AISI 1020 cementados y una espiga de acero AISI O1, con carga de 5 N y distancia de deslizamiento de 1500 m.....	85
Fig. 3.13. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero AISI 1020 cementados y una espiga de acero AISI O1, con carga de 10 N y distancia de deslizamiento de 1500 m.....	86
Fig. 3.14. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero AISI 1020 cementados y una espiga de acero AISI O1, con carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 1500 m.....	86
Fig. 3.15. Curvas de desgaste respecto a la distancia de deslizamiento.....	90

SÍMBOLOS Y SIGLAS

R_t	Altura máxima de un valle a una cresta
R_a	Línea central media
R_s	Raíz media cuadrática
F	Carga normal a una superficie
A_e	Área de contacto elástico
r	Radio
E	Módulo de Young
n	Número de asperezas por unidad de área
f_f	Resistencia a la fricción
S	Fuerza cortante
τ	Esfuerzo cortante
A_t	Superficie en flujo plástico
P	Factor de compresión
σ	Esfuerzo de compresión
d	Profundidad de indentación
μ	Coeficiente de fricción
V	Volumen de material eliminado
s	Distancia de deslizamiento
σ_y	Esfuerzo de fluencia
ASTM	American Society for Testing and Materials
TTQ-C	Tratamiento termoquímico de cementación
ω	Velocidad angular
t	Tiempo
v	Velocidad de deslizamiento
MB	Metal base
C	Metal cementado
DE	Desviación Estándar

INTRODUCCIÓN

El proceso de desgaste en los elementos de máquinas se da debido al movimiento relativo de dos piezas en contacto sometidas a una carga, produciendo así la pérdida de material de dichos elementos. El fenómeno del desgaste está ligado a las direcciones y tipos de movimientos entre las superficies en contacto y el medio que rodea las mismas en el momento de la interacción. El desgaste es una de las causas de fallas más comunes de las piezas de aceros, debido a que estas, en su mayoría de aplicaciones se encuentran sujetas a movimientos relativos entre sus superficies de otros elementos de máquinas de materiales iguales o de distintas naturalezas. Así, con el fin de producir piezas resistentes al desgaste, se han desarrollado muchos tratamientos superficiales, entre los cuales se encuentra el tratamiento termoquímico de cementación, con el cual se permite obtener piezas con un núcleo tenaz, capaz de absorber cargas de impacto y una capa externa resistente al desgaste.

A nivel experimental se puede determinar el comportamiento ante la fricción y el desgaste entre dos materiales utilizando diferentes equipos de ensayos, los parámetros de operación de estos equipos permiten crear las condiciones de simulación necesarias para analizar con certeza el comportamiento del desgaste con las distintas condiciones de ensayo (carga, distancia de deslizamiento, velocidad, entre otras). Uno de estos equipos es la máquina para ensayos tipo espiga sobre discos, el cuál será utilizado en el presente trabajo para caracterizar el comportamiento al desgaste de un acero AISI 1020 cementado y un acero AISI O1 bajo diferentes parámetros de ensayo.

El primer capítulo de este trabajo inicia con la definición del desgaste, para abrir paso a los demás conceptos y consideraciones que se toman durante el estudio del mismo. Se describen los tipos de ensayos para el estudio del desgaste y se hace especial énfasis en el ensayo tipo espiga sobre disco, pues es el que se utilizará para la ejecución de la presente investigación y por lo

tanto, también se hace mención a las normas que rigen dicho ensayo. Finalmente, dentro del capítulo se incluye una sección referente al tratamiento termoquímico de cementación, con énfasis en el método de cementación por carburantes sólidos, debido a que será el proceso a ejecutar durante la investigación.

El segundo capítulo comprende el diseño experimental de la investigación, su contenido consiste en las diferentes etapas en el desarrollo del experimento, desde el dimensionamiento de los especímenes, maquinado de los mismos, la ejecución del tratamiento termoquímico de los discos y su post tratamiento térmico y el tratamiento térmico de las espigas. Posteriormente se describe la realización de los ensayos tipo espiga sobre disco, estableciendo las diferentes combinaciones de carga, distancia de deslizamiento y condición de material. La etapa experimental incluye además la medición de dureza de los especímenes cementados y la determinación del espesor de la capa cementada.

En el tercer capítulo se presentan los resultados obtenidos durante el desarrollo experimental, iniciando con los resultados de la medición del espesor de la capa cementada, siguiendo con la determinación de dureza de los especímenes cementados y posteriormente con los resultados y análisis de los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco. Dicho análisis consiste en el tratamiento estadístico del desgaste medido por la pérdida de peso tanto de los discos como de la espiga y estableciendo la relación del desgaste con la distancia de deslizamiento para cada condición de carga, también se presenta el análisis del coeficiente de fricción entre el par de materiales bajo las diferentes condiciones de carga y distancia de deslizamiento, caracterizando de esta forma el proceso de desgaste para el par de materiales en estudio.

1. MARCO TEÓRICO

En el este capítulo se establecen los conceptos principales que permiten obtener un punto de partida para el estudio del desgaste, a su vez se describen los diferentes estudios que se realizan para caracterizar el desgaste, haciendo énfasis en el estudio de desgaste tipo espiga sobre disco, además, como medida para minimizar los efectos del desgaste, para finalizar se presenta un apartado referente al tratamiento termoquímico de cementación.

1.1. DESGASTE

El proceso de desgaste se puede definir como la pérdida de material de las superficies en contacto entre dos cuerpos, cuando se someten a un movimiento relativo bajo la acción de una fuerza (Sampén, 2003). Por lo tanto, siempre que haya un movimiento relativo entre dos sólidos que soportan carga, existe una situación potencial de desgaste, dicho movimiento se puede considerar unidireccional o de vaivén, ya sea deslizante o de rodamiento. Para el caso de estos dos últimos, también se puede dar una combinación de los mismos o el desgaste se puede dar debido a un movimiento oscilatorio de pequeñas amplitudes (Sarkar, 1990). Para comprender el desgaste, es necesario el estudio de la topografía y la naturaleza de las superficies. Es por ello que el grado de deformación superficial y subsuperficial de los sólidos representa una parte fundamental en el mecanismo de fricción y desgaste, por lo que al analizar la naturaleza y cantidad de desgaste de dos superficies en contacto, se deben estudiar los esfuerzos de contacto y los tipos de movimiento (Sarkar, 1990).

Junto al concepto de desgaste, es importante definir el concepto de fricción, el cual se define cómo la resistencia al movimiento que se produce cuando dos objetos sólidos que se encuentran en contacto, son puestos en movimiento relativo uno con respecto del otro.

1.1.1. TIPOS DE DESGASTE

Un metal puede ser sometido a un movimiento relativo ya sea con un cuerpo sólido o no sólido, así como también puede existir interacción entre metal y líquidos (agua o aceites lubricantes). Los tipos de desgaste se clasifican según la naturaleza del movimiento o los medios involucrados en una interacción de metales bajo carga. Según el último criterio, la clasificación del tipo de desgaste es la siguiente:

- a) Metal contra metal.
- b) Metal contra sólido no-metálico.
- c) Metal contra fluido.

No obstante, debido a que la naturaleza de las superficies en contacto puede cambiar de manera inesperada, y lo que antes era metal contra metal se puede volver metal contra no-metal, o bien una lubricación que en un principio era adecuada podría fallar posteriormente; la clasificación anterior pierde validez al aplicarla en situaciones reales. Por lo tanto, se prefiere clasificar al desgaste en virtud de la naturaleza del movimiento o de los medios que intervienen en una interacción de metales bajo carga. Los tipos principales de desgaste son: por adhesión, por abrasión, por erosión, por cavitación y por vibración (Sarkar, 1990).

El **desgaste por adhesión** ocurre cuando dos superficies se deslizan una sobre la otra o existe una presión que mantiene unidas a dichas superficies. La tendencia de dos superficies en contacto a adherirse proviene de fuerzas de atracción que existe entre los átomos de la superficie de ambos materiales. Si estas dos superficies en contacto se separan mediante la aplicación de una fuerza normal o tangencial, las fuerzas de atracción entre los átomos generan un esfuerzo que causa el desprendimiento de material de una superficie hacia la otra. El material desprendido tiene forma de partículas pequeñas que normalmente se transfieren a la otra superficie o se encuentran como partículas sueltas fuera de dicha superficie. Para el caso del desgaste por adherencia el movimiento relativo puede ser deslizamiento unidireccional o de vaivén, o bien

la interacción ocurre bajo carga en un contacto oscilatorio de pequeña amplitud (Sarkar, 1990).

El **desgaste por abrasión** tiene lugar siempre que estén presentes partículas extrañas duras entre las superficies en contacto. Las partículas abrasivas se incrustan en una de las superficies y actúan como herramienta de corte, removiendo material de la otra superficie. Estas partículas pueden proceder del ambiente (arena y/o polvo) o como consecuencia del desgaste por adhesión y/o por un proceso de corrosión (Sarkar, 1990).

El **desgaste por erosión** es causado por un fluido a alta presión con partículas sólidas en suspensión las cuales al impactar sobre una superficie arrancan material de ella debido a los efectos de momento de las partículas. La pérdida de material puede ser significativa, provocando roturas por fatiga. El grado de desgaste tiene relación con el ángulo de incidencia de la partícula con respecto a la superficie.

El **desgaste por vibración** se produce entre dos superficies que tienen movimiento oscilatorio relativo de pequeña amplitud, del cual se forman partículas abrasivas que originan cavidades en la superficie a medida que la oscilación continúa.

El **desgaste por cavitación** se origina en superficies entre las que existe fluido, el cual da origen a la formación de burbujas de vapor cuando éste llega a una presión menor que la presión de vapor. Estas burbujas son transportadas por el fluido hasta una región de mayor presión, donde el vapor regresa al estado líquido de forma súbita aplastándose bruscamente las burbujas. Si las burbujas de vapor se encuentran cerca o en contacto con una de las superficies cuando cambian de estado se producen presiones localizadas muy altas, ocasionando picaduras en dicha superficie (Sarkar, 1990).

El **desgaste por fatiga** surge como resultado de las cargas cíclicas, el cual probablemente es el mecanismo predominante de la mayoría de tipos de desgaste. Sin embargo, considerar que un tipo particular de falla ha sido originado por fatiga resulta un tanto confuso, por lo que se reserva el uso del término solamente a la falla entre contactos lubricados, como en el caso de los

rodamientos de bolas o rodillo, engranes, levas y entre otros mecanismos, donde la pérdida de material se produce debido al desbaste de capas superficiales o por picaduras, como en el caso de los engranes. Las grietas por fatiga aparecen debajo de la superficie en un punto en que el esfuerzo cortante es máximo (Sarkar, 1990).

1.1.2. TOPOGRAFÍA DE LAS SUPERFICIES

Con el fin de comprender la interacción entre las superficies de las partes móviles de una maquinaria, es importante conocer la naturaleza original de dichas superficies. Para ello es necesario conocer aspectos importantes como si éstas se encuentran libres de contaminantes u óxidos y si es mecánicamente suave. Pero lo más importante que se tiene que comprender sobre los mecanismos de fricción y desgaste es conocer que no existe una superficie perfectamente plana a escala microscópica.

Mediante los métodos conocidos de preparación de superficies como el maquinado, pulido, cepillado, etc.; no se puede llegar a obtener una superficie perfectamente lisa, ya que éstas presentan asperezas, es decir ondulaciones en forma de colinas y valles. En la Fig. 1.1 se pueden observar diferentes tipos de asperezas de una superficie, en el caso de la Fig. 1.1a se observa una superficie perfectamente lisa, para el caso de las Fig. 1.1b-e todas las protuberancias poseen la misma profundidad, aunque la longitud de onda es macrogeométrica como en la Fig. 1.1b, por lo tanto esta superficie se define como lisa, pero no plana. La longitud de onda también puede ser microgeométrica, como en el caso de la Fig. 1.1e la longitud de onda es corta o microgeométrica, a esta superficie se le define plana pero rugosa. En las Fig. 1.1c-d se ilustran superficies cuya rugosidad están entre la Fig. 1.1b y d.

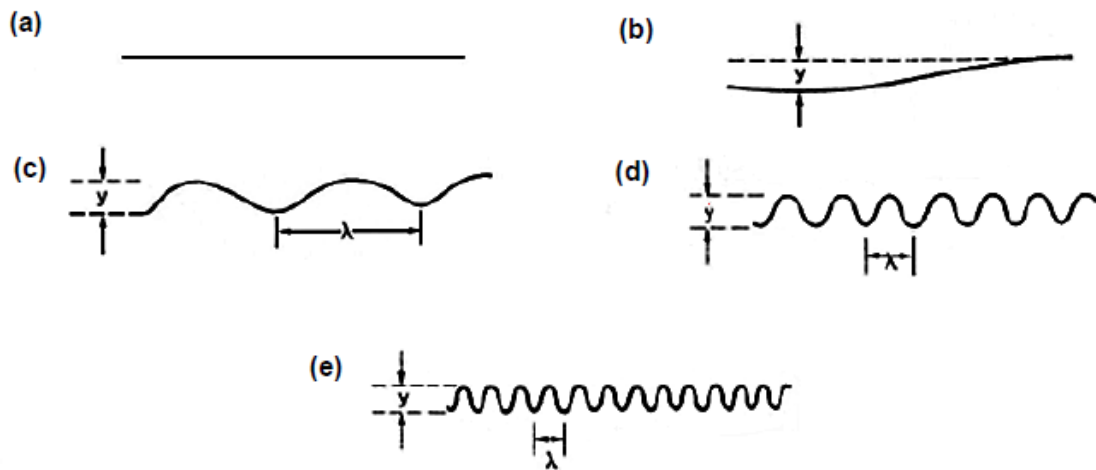


Fig. 1.1. Diferentes tipos de asperezas de una superficie que presenta la misma altura entre cresta y valles, pero diferentes longitudes de onda: (a) Superficie lisa, (b) Superficie lisa pero no plana, (c) Superficie plana rugosa, (d) Superficie plana rugosa de longitud de onda macrogeométrica, y (e) Superficie plana rugosa de longitud microgeométrica (Sarkar, 1990).

El medidor de Taylor Hobson es un instrumento ampliamente usado debido a que permite registrar con rapidez la microtextura de una superficie. El principio de funcionamiento consiste en mover un estilite sobre una longitud representativa de la superficie rugosa, como se observa en la Fig. 1.2a, el movimiento oscilatorio del estilite inclina la armadura sobre la cual están enrolladas las bobinas I_1 e I_2 , cada una alimentada con una corriente de alta frecuencia mediante un oscilador de válvula "O", tal como se presenta en el esquema del circuito eléctrico representado en la Fig. 1.2b. El movimiento de la armadura produce una variación en la impedancia de las bobinas y modifica la magnitud de la corriente de alta frecuencia, donde dicha variación en la magnitud de la corriente es amplificada por "A". Un desmodulador "B" modifica la corriente de salida y alimenta al registrador del estilite, de modo que en éste se refleje la variación en la corriente de alta frecuencia a causa del movimiento de la armadura. Como las crestas y el espaciado entre ellos es pequeño, los trazos se amplifican de 400 a 75000 veces (Sarkar, 1990).

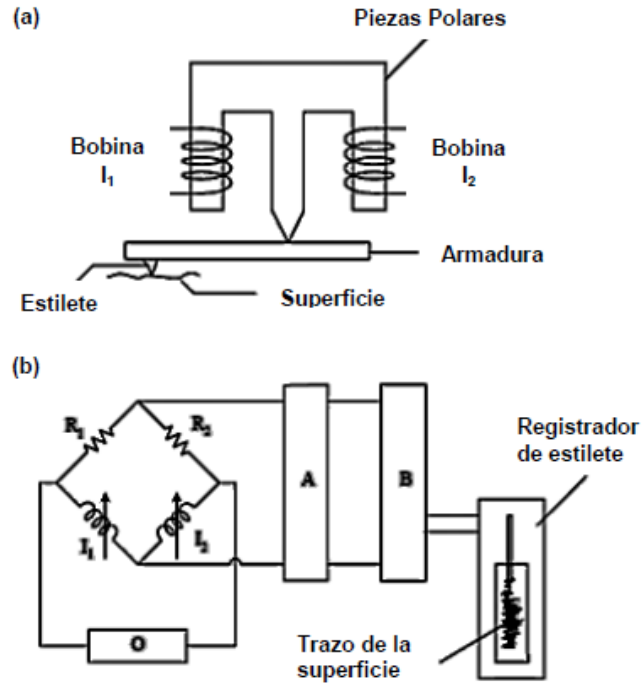


Fig. 1.2. Principios de un medidor: (a) Esquema del conjunto estilote y armadura; y (b) Esquema del circuito eléctrico del cual se obtiene el trazo de la superficie (Sarkar, 1990).

Las superficies con diversos grados de rugosidad pueden tener el mismo valor de altura máxima de una cresta a un valle R_t (Fig. 1.3), así que la medición de la altura entre cresta y valle no describe totalmente una superficie.

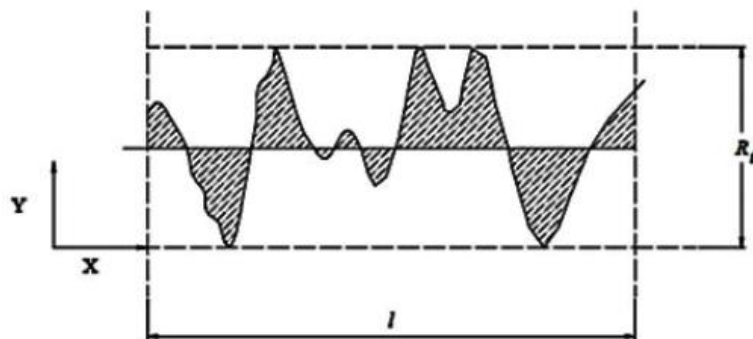


Fig. 1.3. Asperezas superficiales. R_t es la altura máxima entre crestas y valles (Sarkar, 1990).

Halliday midió los ángulos de aspereza de la superficie con ayuda de un microscopio de reflexión electrónica, para lo cual, utilizó la superficie colocada en una posición oblicua exagerada de manera que se pudiera observar el perfil de las asperezas. Las asperezas que han estado sujetas a abrasión, con frecuencia presentan una pendiente a distintos ángulos en relación con la superficie y en dos direcciones. En la Fig. 1.4 se presenta la naturaleza de las pendientes de las asperezas donde el ángulo α anterior a la partícula abrasiva siempre es mayor que β . Los ángulos de aspereza tienen una función positiva en el modo de deformación de los metales cuando se inicia el movimiento relativo de las superficies bajo la acción de una carga (Halliday, 1955).

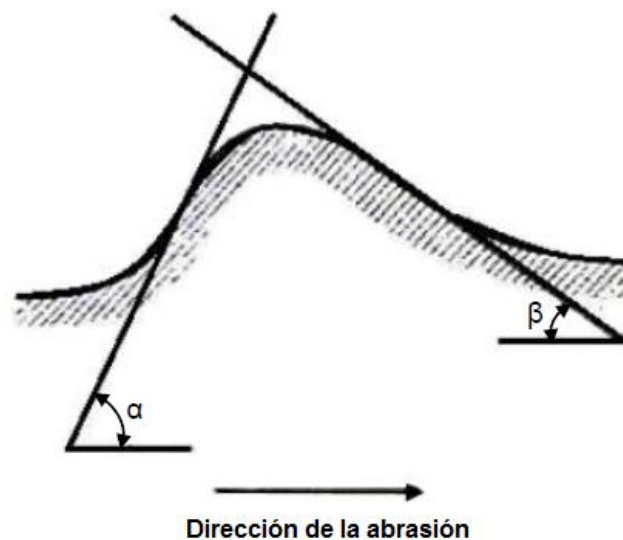


Fig. 1.4. Pendiente de las asperezas de una superficie erosionada según (Halliday, 1955).

La rugosidad de las superficies se ha descrito de la siguiente forma:

- La altura máxima de una cresta a un valle, R_t (Fig. 1.3) en mm;
- La línea central media, l en cm o R_a , y la raíz media cuadrática, R_S ; y
- La curva de apoyo.

Además, es importante hacer una estimación de la longitud de onda y especificar el espaciamiento entre asperezas, para ello es necesario determinar el número de crestas para una determinada longitud. Un método común es

expresar la altura promedio de las ondulaciones superficiales calculando la línea central media R_a o la raíz media cuadrática R_s . El valor de R_a y R_s para una longitud están dados por las Ecs. 1.1 y 1.2, respectivamente (Sarkar, 1990).

$$R_a = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} |Y| dx \quad (1.1)$$

$$R_s = \left(\frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} y^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.2)$$

1.1.3. CONTACTO DE SÓLIDOS

Si se presiona una superficie sobre otra, la carga se soporta por los bordes de unas cuantas crestas en la superficie inferior, suponiendo que el miembro superior del par metálico sea perfectamente plano. Así pues, existe un área de contacto aparente en la interfase de ambas superficies aunque en las puntas de las asperezas el área real de contacto sólo es de unos cuantos puntos.

Si se considera que un cuerpo hemisférico duro se desliza sobre una superficie blanda y lisa bajo la acción de una carga (F) como se presenta en la Fig. 1.5, y se supone que la espiga y la superficie son perfectamente lisas, entonces se puede demostrar que el área real de contacto es proporcional a la raíz cúbica de la carga al cuadrado si el contacto es de naturaleza elástica (Ec. 1.3), esto significa que la carga es baja y ninguno de los dos materiales alcanza el esfuerzo de fluencia.

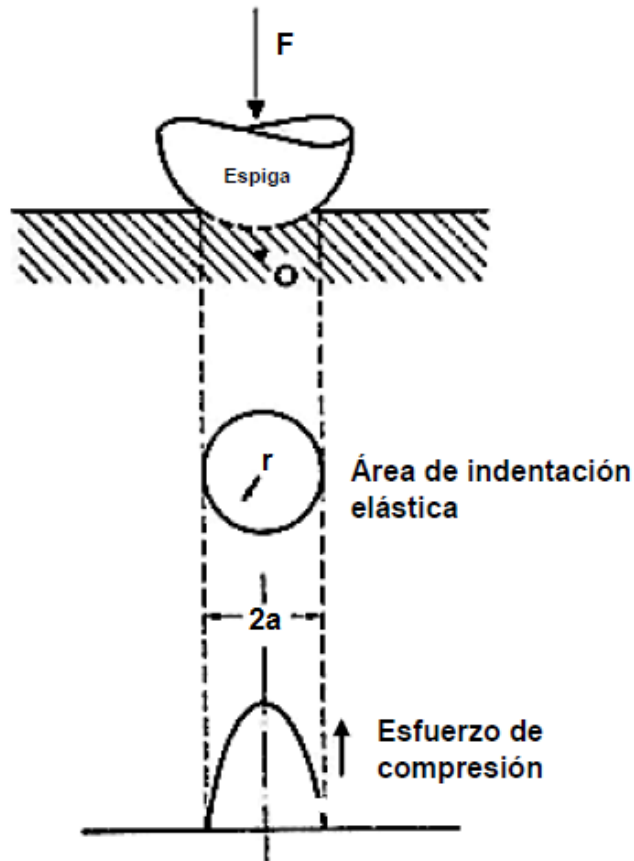


Fig. 1.5. Cuerpo hemisférico que presiona sobre una superficie plana (Sarkar, 1990).

$$A_e = \pi \left[\frac{3Fr}{4E} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (1.3)$$

donde: F es la carga normal aplicada en N, r es el radio de la curvatura en mm, E es el módulo de Young en MPa, y A_e es el área de contacto elástico en mm².

Sin embargo, las superficies ingenieriles, nunca son perfectamente lisas ya que además de tener asperezas, éstas a su vez estarán cubiertas de microasperezas tal como se presenta en la Fig. 1.6. Archard demostró que el área real de contacto elástico es casi proporcional a la carga cuando en el análisis se consideran las asperezas y se toma en consideración su rugosidad (microasperezas) (Archard, 1957).

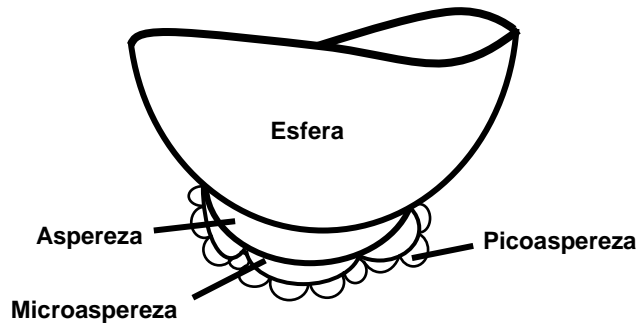


Fig. 1.6. Esfera con microaspererezas (Sarkar, 1990).

Dejando de lado la presencia de microaspererezas, Halling idealizó una superficie rugosa con aspererezas perfectamente esféricas, cada una de radio R (Halling, 1975). Otra asunción que se hizo en lo que a la superficie lisa respecta es la penetración de estas protuberancias y la carga normal aplicada (F) es tal que la deformación es totalmente elástica. Así, estas suposiciones le sirvieron para demostrar que si el contacto es elástico, el área real de contacto no es directamente proporcional a la carga normal aplicada, lo cual se presenta en la Fig. 1.7.

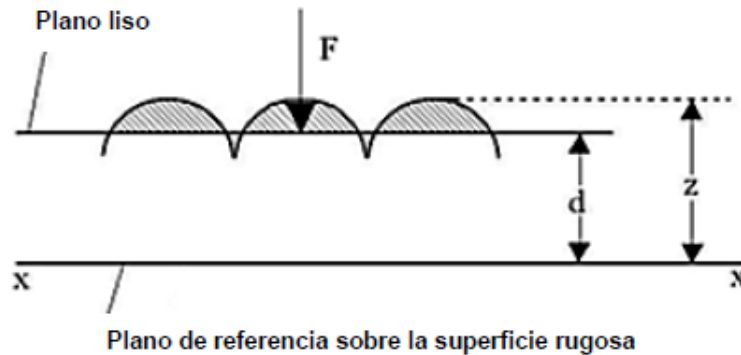


Fig. 1.7. Superficie rugosa idealizada penetrada por una superficie plana (Sarkar, 1990).

A partir de lo cual se dedujo la Ec. 1.4:

$$F_e = \frac{4E}{3\pi^{\frac{1}{2}}n^{\frac{1}{2}}r} A_e^{\frac{3}{2}} \quad (1.4)$$

donde: F_e es la carga normal aplicada en N, y n es el número de aspereza por unidad de área en mm^{-2} . En el mismo sentido de la Ec. 1.4 se puede deducir que:

$$A_e = \alpha F_e^{\frac{2}{3}} \quad (1.5)$$

El análisis anterior se basó en una distribución de aspereza idealizada, ya que las superficies reales tienen asperezas de altura variable y distribución aleatoria, tal como se presenta en la Fig. 1.8.

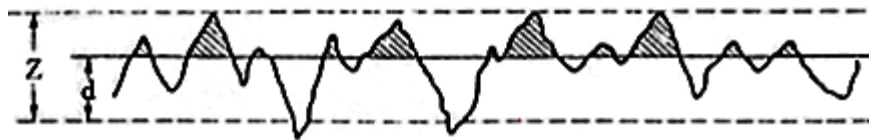


Fig. 1.8. Una superficie real penetrada por una superficie plana (Sarkar, 1990).

Greenwood y Williamson encontraron que el área real de contacto es directamente proporcional a la carga normal aplicada, aunque el contacto sea elástico, este resultado fue obtenido al realizar estudios en superficies rugosas reales (Greenwood & Williamson, 1966).

Si a la superficie de la Fig. 1.7 se le aplica una carga normal que provoque el flujo plástico en dicha superficie, ésta presentará endurecimiento por trabajado en frío. En este sentido, los contactos posteriores con esta superficie serán de naturaleza elástica (Sarkar, 1990).

1.1.4. FRICCIÓN

Bodwen y Tabor consideran la resistencia a la fricción entre dos superficies como la suma de dos componentes: una a cortante y otra de

hundimiento (Bowden & Tabor, 1939). Así, si nuevamente se considera que una espiga hemisférica se apoya sobre una superficie plana bajo la acción de una carga normal F , esto ocasionará que en la superficie plana se forme una curva cóncava AOB cuya altura máxima es OC (h) y un aplanamiento de cuerda d (diámetro de contacto), tal como se presenta en la Fig. 1.9a. Sea f_f la resistencia a la fricción, que es la fuerza tangencial necesaria para iniciar el deslizamiento como se observa en la Fig. 1.9b.

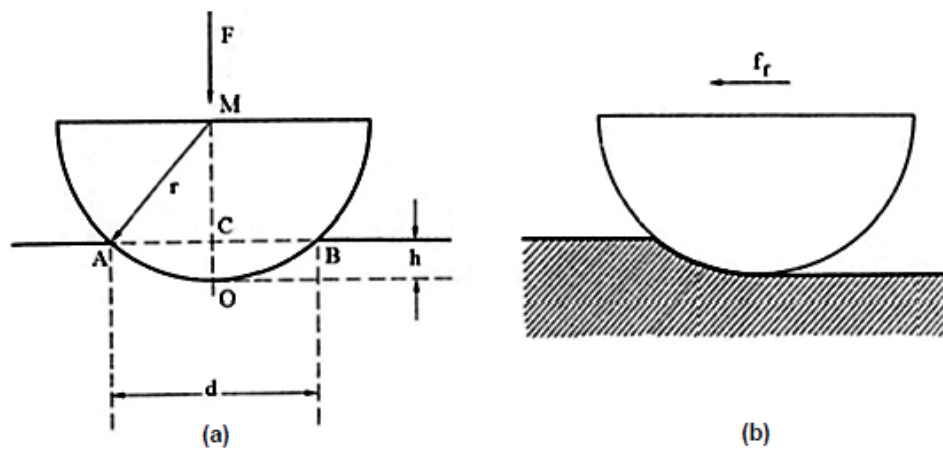


Fig. 1.9. Una espiga hemisférica se desliza sobre una superficie suave bajo la acción de una carga: (a) Espiga estacionaria; y (b) Espiga en movimiento, produciendo una huella en forma de ranura (Sarkar, 1990).

El efecto de la carga F es provocar la deformación de aquellas asperezas de la superficie plana que han hecho contacto con la espiga. Esto es, las superficies de los dos cuerpos se adhieren donde existe contacto.

Esto provoca que el esfuerzo cortante que hace que las uniones formadas por deformación plástica se rompan completamente antes de que la espiga se pueda mover sobre la superficie. Sí τ es el esfuerzo cortante del metal de la superficie que ha fluido plásticamente y A_t es el área de contacto real entre caras, la fuerza cortante en la superficie (S) se define por la Ec. 1.6:

$$S = A_t \tau \quad (1.6)$$

Es evidente que para mover horizontalmente la espiga en la misma dirección, se requiere de una fuerza adicional para desplazar la pared de metal delante de ella, a medida que se hunde en el metal de la superficie. Esta fuerza adicional es llamada factor de compresión P , la cual está dado por la Ec. 1.7:

$$P = A'\sigma_y \quad (1.7)$$

donde: A' es el área de la trayectoria correspondiente al segmento $AOBC$ (área de contacto), ver Fig. 1.9a y está dada por la ecuación 1.8:

$$A' = \frac{d^3}{12r} \quad (1.8)$$

Sustituyendo la Ec. 1.8 en la Ec. 1.9 se obtiene:

$$P = \frac{d^3}{12r}\sigma \quad (1.9)$$

Puesto que la resistencia a la fricción total, f_f , está dada por la suma de los factores de cortante y compresión, la Ec. 1.10 se expresa:

$$f_f = A_t\tau + \frac{d^3}{12r}\sigma \quad (1.10)$$

Para la mayoría de los metales duros apoyados sobre superficies blandas, o posiblemente para la mayoría de las combinaciones con cargas ligeras, la profundidad de la indentación es pequeña, de manera que el término d en la Ec. 1.9 se puede despreciar y el factor de compresión se hace insignificante. En este caso se tiene la expresión 1.11:

$$f_f = A_t\tau \quad (1.11)$$

Por otro lado, el coeficiente de fricción, μ , es la resistencia a la fricción por unidad de carga, y está dado por la siguiente ecuación:

$$\mu = \tau/\sigma \quad (1.12)$$

Amontons (1699) postuló dos leyes sobre la fricción, confirmados por los resultados anteriores, las cuales son:

- a) Primera ley: la fuerza a la fricción es independiente del área aparente de contacto y es sólo proporcional a la fuerza aplicada.
- b) Segunda ley: el coeficiente de fricción es independiente de la carga aplicada.

1.1.5. TEORÍA MOLECULAR DE LA FRICCIÓN Y DEL DESGASTE

La teoría molecular de la fricción y del desgaste fue propuesta por Tomlinson. Este autor estudió detalladamente la naturaleza de las fuerzas atómicas en un retículo cristalino y dedujo expresiones para la fricción seca y el desgaste de sólidos.

La hipótesis de Tomlinson, consiste fundamentalmente en que en condiciones de equilibrio las fuerzas de repulsión entre los átomos de un sólido contrarrestan las fuerzas de cohesión. Sin embargo, cuando dos superficies se encuentran en contacto, un átomo de uno de ellos llegará a estar lo bastante cerca de otro átomo del segundo cuerpo como para entrar al campo de repulsión. Cuando esto sucede, las dos superficies se separan causando una pérdida de energía que se manifiesta como la resistencia debida a la fricción.

Cuando un átomo se desplaza de su estado natural de equilibrio, tiende a regresar a su posición original. Sin embargo, durante una separación puede entrar al campo de atracción de algún átomo vecino, así el átomo en tránsito queda sujeto a una atracción dictada por una distancia de separación ℓ en ese

instante y considerando la fuerza interatómica de cohesión, F_0 , entre dos átomos en el cristal. La energía media, E , para un contacto atómico puede expresarse como $E = F_0 \ell$ y considerando que la energía total perdida es nE , la cual es igual al trabajo mecánico que viene expresado por μP_x , por lo tanto, la expresión 1.13 dicta que:

$$\mu = \alpha \frac{F_0 \ell}{e p_0} \quad (1.13)$$

donde: μ es el coeficiente de fricción, α es el factor de probabilidad, e es el número de hileras de átomos, y p_0 es el valor medio aritmético de las fuerzas individuales de repulsión.

Los términos F_0 y p_0 están asociados con las constantes elásticas del material. Además, la Ec. 1.13 demuestra que el coeficiente de fricción es independiente de la carga aplicada.

El grado de proximidad o de deformación entre dos superficies depende de la probabilidad estadística a medida que las superficies se separan en el plano horizontal durante el deslizamiento y tratan de acoplarse debido a las fuerzas de atracción entre sus átomos. Cuando se encuentran suficientemente cerca, los átomos se repelen y su tendencia natural es regresar a su posición original. Una hipótesis acertada para determinar el grado de proximidad entre dos superficies consiste en que un átomo se puede desprender y moverse a una distancia lo suficientemente dentro del campo de otro átomo en la superficie opuesta, donde encuentra una nueva posición de equilibrio. Esto significa que los átomos de un cuerpo pueden ser extraídos por los otros átomos en la superficie opuesta. Según Tomlinson, éste es el mecanismo del desgaste, la Ec. 1.14 la cual expresa la masa total de metal eliminado bajo los efectos del desgaste:

$$M = \frac{2\alpha E_t \rho}{\mu \sigma_y} \quad (1.14)$$

donde: M es la masa total de metal eliminado en g, ρ es la densidad del metal que se desgasta g/mm^3 , σ_y es el esfuerzo de fluencia en MPa, μ es el coeficiente de fricción, α es el factor de probabilidad, y E_t es la energía total disipada en kJ. Así, en la Ec. 1.14 se demuestra que la masa total de material eliminado es inversamente proporcional al esfuerzo de fluencia (Sarkar, 1990).

1.1.6. DESGASTE POR FRICCIÓN

Los procesos de desgaste en metales se clasifican según el tipo de mecanismo que cause la eliminación del material de las superficies. Si la pérdida de volumen o peso se grafica en forma continua relacionándola con la distancia de deslizamiento, se obtiene una curva característica como la que se presenta en la Fig. 1.10. El punto O corresponde al encendido de la máquina; es decir, cuando la distancia de deslizamiento es cero.

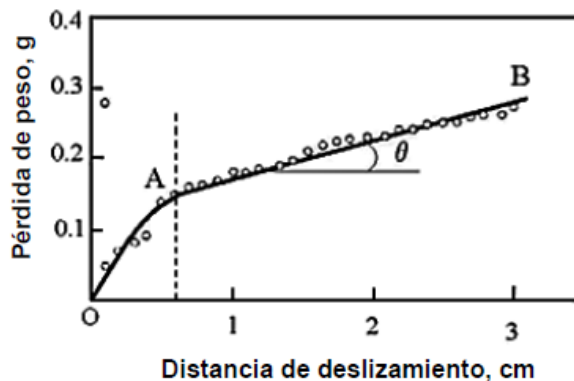


Fig. 1.10. Curva característica de desgaste contra distancia de deslizamiento (Sarkar, 1990).

En la Fig. 1.10 se puede observar el patrón de una curva de desgaste típica, el segmento AO es el desgaste inicial de acoplamiento y AB es el estado estacionario y tiene una tendencia lineal. La pendiente del régimen estacionario se utiliza para expresar la razón de desgaste de un material por unidad de

distancia de deslizamiento a una carga y velocidad determinada, la cual será una constante para cada material, dependiendo de la naturaleza de la otra superficie; dicha pendiente se define como $\tan \theta$.

Se puede establecer una ecuación matemática (Ec. 1.15) para el desgaste inicial de acoplamiento, también conocida como estado inestable o transitorio, durante los primeros instantes del desgaste, la proporción de volumen eliminado por unidad de distancia deslizada debe ser función del volumen de metal disponible en las uniones, en términos matemáticos se expresa por medio de la Ec. 1.5:

$$\frac{dV}{dS} = -nV \quad (1.15)$$

donde: V es el volumen de material eliminado, n es la constante que depende de la carga aplicada, y dV/dS es la razón de volumen de desgastado. El signo negativo representa el caso en que el volumen original en las uniones disminuye con la distancia de deslizamiento (Sarkar, 1990).

1.1.7. DESGASTE POR ADHERENCIA

Dos superficies que interactúan no sólo tienen contacto en unos puntos aislados, sino que hace que aparezcan esfuerzos elevados en estas áreas, lo cual produce una deformación plástica entre las superficies. Hasta ahora, no existe una ecuación general que permita relacionar todos los elementos involucrados en el desgaste y que pueda ser utilizada por los ingenieros de diseño, posiblemente porque el desgaste es un proceso complejo que depende, entre otras variables de la carga normal, la estructura cristalina y las propiedades mecánicas de los materiales. Sin embargo, se han formulado ecuaciones para el desgaste y se ha estudiado el desgaste por adherencia que

se define como el proceso que produce pérdida de metal entre superficies que interactúan como resultado de la adherencia entre asperezas.

Como se ha establecido anteriormente, Tomlinson dedujo que el desgaste es inversamente proporcional al esfuerzo de fluencia del metal. De esta deducción tomó base R. Holm y propuso una ecuación que establece que a medida comienza el deslizamiento, el contacto entre átomos elimina a los átomos superficiales en los encuentros favorables, de manera que la pérdida de volumen V para una distancia de deslizamiento S viene dado por (Holm, 1946):

$$\frac{V}{S} = \beta \frac{F}{\sigma_y}$$

$$\frac{V}{S} = \beta A_t \quad (1.16)$$

donde: S/V es la razón de volumen desgastado, β es el número de átomos que se eliminan por encuentro, y A_t es el área real de contacto. El término S/V es la razón del volumen desgastado por unidad de distancia deslizada y se observa que es inversamente proporcional al esfuerzo de fluencia, se puede observar una similitud a la Ec.1.14.

La Ec. 1.16 se establece que el volumen total de material eliminado por deslizamiento es proporcional a la carga normal aplicada y a la distancia de deslizamiento e inversamente proporcional al esfuerzo de fluencia.

La supuesta remoción de metal por extracción de átomos ha sido rebatida por muchos investigadores en base a que los residuos del desgaste invariablemente son agregados de partículas metálicas más pequeñas. Esto indica que en un encuentro, se elimina una fracción de los límites de las superficies que es mucho mayor que el tamaño de un átomo.

Se han realizado ensayos para determinar la razón de desgaste, haciendo correr espigas cónicas de latón y de acero sobre discos de acero, al graficar diferentes puntos del volumen de metal eliminado contra distancia de

deslizamiento, se observa un período inicial de acoplamiento seguido por un estado estacionario de desgaste, como se puede observar en la Fig. 1.11.

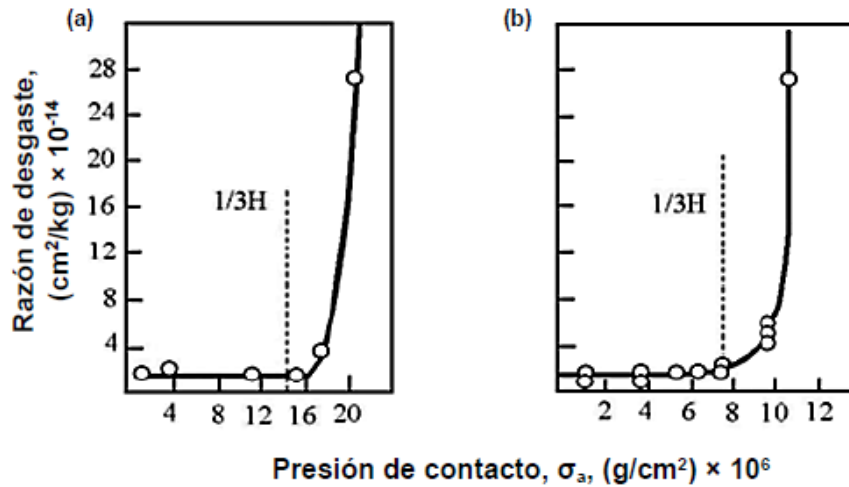


Fig. 1.11. Razón de desgaste en función de la presión de contacto aparente (Sarkar, 1990).

En base a la Fig. 1.11 Burwell y Strang dedujeron la Ec. 1.17:

$$h = \beta \frac{\sigma_a}{\sigma_y} S \quad (1.17)$$

donde: h es la altura perdida debido al desgaste, σ_a es la presión de contacto aparente ejercida por la espiga sobre el disco, β es la probabilidad de producir un fragmento por desgaste en un encuentro, σ_y es el esfuerzo de fluencia, y S es la distancia de deslizamiento.

En la Ec. 1.17 se representa la pérdida de altura de la espiga debido al desgaste. Burwell y Strang graficaron la razón de desgaste expresada como $h/\sigma_a S$ vs σ_a , registrando que para una presión de contacto σ_a , ésta es equivalente a la tercera parte de la dureza de la espiga; por lo tanto, se obtiene un considerable aumento en el valor de la razón de desgaste.

Dos superficies planas hacen contacto con las periferias superiores que fluyen plásticamente a causa de los esfuerzos localizados que se concentran en

ciertos puntos de la superficie. Cuando la carga es muy baja, el contacto sólo ocurre en tres puntos y, a medida que aumenta el esfuerzo externo, el área inicial de contacto se incrementa, cuando esto sucede, se da una mejor adherencia entre los dos metales; esto es, el espacio entre las dos superficies disminuye, lo que da como resultado que más protuberancias hagan contacto en otras partes. Se descarta la idea de que se eliminen átomos aislados de las superficies; es decir, se supone que el desgaste se produce por eliminación de fragmentos de metal de la superficie.

No todas las uniones que se rompen forman residuos de desgaste, esto es importante ya que se sabe que una fricción alta no necesariamente corresponde a un desgaste proporcionalmente alto; por otro lado, mientras que la ruptura de cada unión da como resultado una componente de resistencia al deslizamiento, no siempre se produce un desprendimiento de la superficie metálica que produzca la formación de residuos, lo que puede significar simplemente que a medida que se rompa la unión, permanece unida a la superficie metálica en forma de áreas rugosas microscópicas o bien si es plástica puede extenderse sobre la superficie metálica.

Las superficies reales no se encuentran en una distribución regular de protuberancias hemisféricas, sino que tienen formas probablemente entre cono y hemisferio. Un factor importante de las superficies tribológicas es que pronto se endurecen por trabajado en frío hasta cierta profundidad y es probable que la interacción sea principalmente elástica, ya que el esfuerzo cortante hertziano máximo se haya por debajo de la superficie, es probable que un agrietamiento por fatiga empiece por un punto y se propague a la superficie para producir residuos de desgaste.

Si la adhesión entre los metales es más fuerte que uno de los metales, o que ambos, el metal más débil sufrirá fractura, en este caso, parte del metal de menor dureza se adhiere al otro. La aspereza a la que se adhiere el metal será más grande y probablemente encontrara más asperezas que antes, además, en algunas áreas se desarrollará una condición de metales semejantes en

contacto, ambos resultados tenderán a promover aún más adhesiones y más transferencia de metal.

La transferencia de metal de una parte a otra ocasionará que una de las partes parezca más desgastada, este desgaste se presentará únicamente en las áreas de las asperezas y tenderá a ocurrir en forma lineal, a esto se le caracteriza por la condición de rayado. Si se desarrollan suficientes adhesiones, la fuerza requerida para romperlas será superior a la fuerza aplicada en la operación, y los metales quedaran imposibilitados para deslizarse entre ellos, esto es lo que se le conoce como condición de desbastado.

El desgaste por adherencia se ha analizado y como resultado se han obtenido ecuaciones, pero tomando en consideración que las superficies que se encuentran en contacto estén perfectamente limpias; es decir, que se encuentren libres de contaminantes, pero en la realidad esto no puede ocurrir, debido a que no se cuenta con condiciones de limpieza química ya que esto se encuentra al vacío y en las atmósferas naturales.

Para el desgaste mecánico se requieren $1/\beta$ encuentros para que se acumule un espesor crítico de óxido (ξ) antes de que éste se separe para formar una partícula de desgaste. Es probable que la película se elimine por hundimiento causado por una aspereza de mayor dureza.

Al realizar las sustituciones requeridas a la Ec. 1.16 se tiene la Ec. 1.18:

$$\frac{V}{S} = \left[A_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \frac{d}{v\xi^2\rho^2} \right] \frac{F}{\sigma_y} \quad (1.18)$$

$$\beta = A_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \frac{d}{v\xi^2\rho^2} \quad (1.19)$$

donde: A_0 : constante de Arrhenius; R : constante universal de los gases; T : temperatura absoluta de la superficie deslizante; d : diámetro del área de contacto; v : velocidad de deslizamiento; ξ : espesor crítico de óxido; ρ : densidad de la capa de óxido.

Debido a que el desgaste en volumen por unidad de distancia deslizada está directamente relacionada con β , un valor alto de este parámetro significa un incremento en el grado de desgaste y viceversa. Si la película de óxido es delgada permanecerá unida a la superficie y la pérdida de volumen estará restringida; sin embargo, se conoce bien el efecto protector de la película de óxido en relación con el daño y desgaste de la superficie.

C. N. Rowe realizó una modificación a la ecuación para el desgaste por adherencia que presentó Holm, en la cual dicha modificación fue incorporar un factor α que toma en consideración la presencia de contaminantes superficiales, el cual se define matemáticamente como $\alpha = A_t/A$ donde A_t es el área real y A es el área aparente de contacto. Esta relación tiene un valor entre cero y la unidad, por lo tanto la ecuación modificada para el volumen de material eliminado V que corresponde a una distancia de deslizamiento S está dado por la Ec. 1.20:

$$V = \alpha\beta A_t S \quad (1.20)$$

De la Ec. 1.20 se puede deducir que cuando A_t es cero, no existirá desgaste, aunque para que α sea la unidad, el área aparente debe ser igual al área total de las uniones (Sarkar, 1990).

1.1.8. TRANSFERENCIA DE METALES DURANTE EL DESGASTE

Es evidente que el proceso de desgaste en situaciones de deslizamiento se relaciona con la formación y el crecimiento de uniones nucleadas por las asperezas que entran en contacto. Es probable que el deslizamiento bajo una carga provoque un cambio en las propiedades metalúrgicas de los materiales en contacto y el efecto tiene una influencia significativa sobre el modo de desgaste.

Los estudios cuantitativos de la transferencia de metal se han llevado a cabo mediante técnicas de rastreo con un estilete radioactivo en las que una espiga radiada se desliza sobre una superficie no radiada y la cantidad de metal que se transfiere se registra por medio de un contador Géiger-Muller unido a la máquina de desgaste. En la Fig. 1.12 se presenta que el primer efecto del deslizamiento es que la espiga se desgaste con mayor rapidez, sin embargo, se llega a una etapa en que la cantidad de metal transferido alcanza un valor constante cuando la rapidez de desgaste llega al estado estacionario.

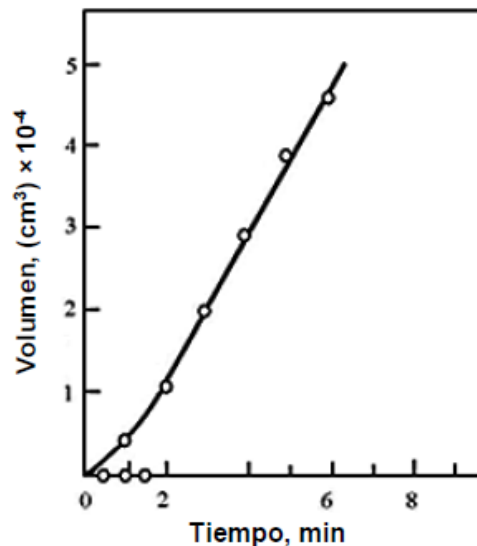


Fig. 1.12. Variación entre el tiempo de desgaste y la transferencia de metal de una espiga de latón que se desliza sobre un anillo de estelita (Sarkar, 1990).

El deslizamiento continuo resulta en un incremento del tamaño de los fragmentos y en la rugosidad de las superficies. El metal se transfiere en forma de partículas discretas según Kerridge y Lancaster, quienes demostraron que un fragmento de desgaste que se desprende de las superficies es aproximadamente ocho veces el área de la partícula transferida y seis veces su espesor (Sarkar, 1990).

1.1.9. EFECTO DE LA TEMPERATURA Y LA VELOCIDAD

Antes de establecer los efectos causados por los cambios de temperatura y velocidad se tiene que recordar que para la realización del estudio del desgaste se consideran diferentes factores necesarios para describirlo; por lo tanto es ahí donde radica su complejidad. Los principales factores que intervienen en el desgaste pueden enumerarse de la forma siguiente:

- a) Variables relacionadas con los materiales en contacto: dureza, tenacidad, estructura y composición química.
- b) Variables relacionadas con el servicio: materiales en contacto, presión, velocidad, temperatura, acabado de la superficie, lubricación y corrosión.

Además, el desgaste que ocurre en la práctica es, en la mayoría de los casos, una combinación de los diferentes tipos de desgaste. Pequeñas partículas que se encuentran entre dos superficies en contacto pueden dar como resultado un desgaste por abrasión, o bien los productos resultantes del proceso de corrosión pueden dar como resultado el desgaste y un daño posterior.

Se ha demostrado que el desgaste de los metales depende principalmente de la interacción de asperezas entre dos superficies que deslizan. La energía disipada debido al trabajo mecánico inevitablemente ocasiona un incremento en la temperatura, aunque esto sucede de manera intermitente en lo que se refiere a los puntos de contacto real por la adherencia y posterior deslizamiento de las uniones. Estos incrementos momentáneos de temperatura tienen una duración del orden de 10^{-4} s. El calor que se desprende en la fricción se disipa en el área circundante, lo que ocasiona que las puntas de las asperezas alcancen temperaturas elevadas, aunque el cuerpo del componente permanezca relativamente frío. Un incremento en la carga o en la velocidad de deslizamiento aumenta la temperatura de las uniones y, en casos extremos, puede causar fusión incipiente.

No existe una forma simple de medir las temperaturas de las áreas reales de contacto, pero se puede obtener la temperatura general de un par de metales en interacción. Puesto que tanto la ley del desgaste por adherencia como la del desgaste por abrasión consideran que las propiedades mecánicas como esfuerzo de fluencia y dureza del metal se ven afectadas por el ambiente térmico, es por ello que es conveniente realizar un estudio de la fricción y del desgaste a temperaturas altas, lo cual resulta importante debido a que las partes rotatorias deben trabajar a altas temperaturas.

J. K. Lancaster realizó experimentos a diferentes temperaturas a espigas de latón 60/40 sobre discos de acero, los cuales lo llevaron a demostrar que a medida que se incrementa la temperatura se aumenta la razón de desgaste de la espiga, logrando así determinar un valor límite de temperatura, el cual depende de la carga normal aplicada, tal como se presenta en la Fig. 1.13, y al sobrepasar el valor máximo se tiene una caída en la razón de desgaste del latón.

En la Fig. 1.13 se presenta la razón de desgaste a una carga constante de 2 kg, con una rotación del disco a una velocidad de deslizamiento de 1.3 cm/s, se utilizó una velocidad de deslizamiento baja para mantener al mínimo el calor producido por fricción. El primer régimen de desgaste (Fig. 1.13) demuestra que la resistencia de contacto es casi constante, pero existe un pequeño incremento progresivo en la fricción. Esto demuestra que la dureza del latón en la espiga disminuye con la temperatura y la razón de desgaste aumenta por ser inversamente proporcional a esta propiedad mecánica.

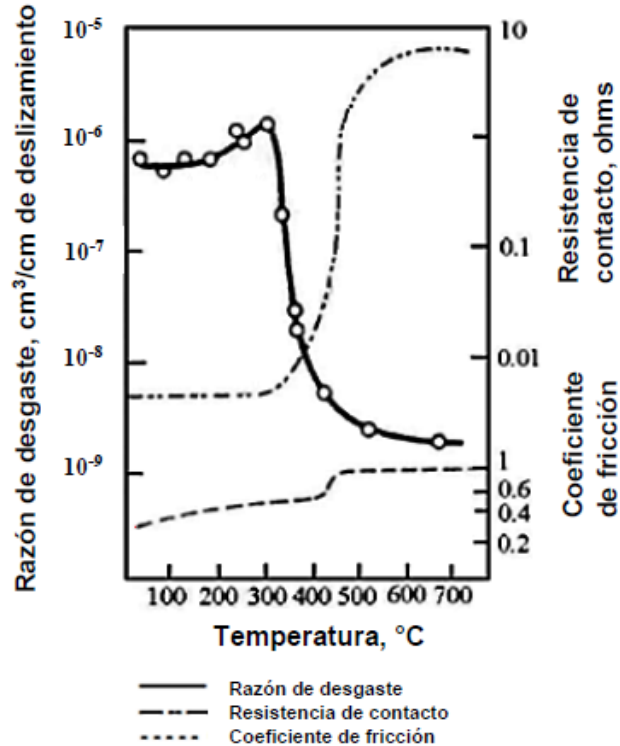


Fig. 1.13. Variación de la razón del desgaste con la temperatura para un latón (60/40), sobre acero para herramientas (Sarkar, 1990).

A cualquier temperatura, existe una carga de transición bajo la cual los óxidos superficiales no se destruyen por completo y la razón de desgaste es baja. Por encima de la carga de transición el contacto metal a metal es amplio y el desgaste es alto. Se ha demostrado que con cualquier carga o temperatura, el mecanismo de desgaste ocurre por transferencia del latón sobre el disco de acero y posteriormente se desprende la película depositada.

Hughes y Spurr han efectuado deslizamiento de espigas de acero sobre discos de hierro colado en un intervalo de velocidades de 100 – 500 cm/s y con cargas variables entre 0.8 – 3 kg. Al incrementar la carga y la velocidad, aumenta la temperatura disminuyendo en consecuencia la dureza de la espiga. Se logró medir la dureza de acero a la temperatura resultante determinada por una combinación particular de carga y velocidad. Si ahora la razón de desgaste

se grafica contra el recíproco de la dureza medida, se obtiene una relación lineal, como se presenta en la Fig. 1.14.

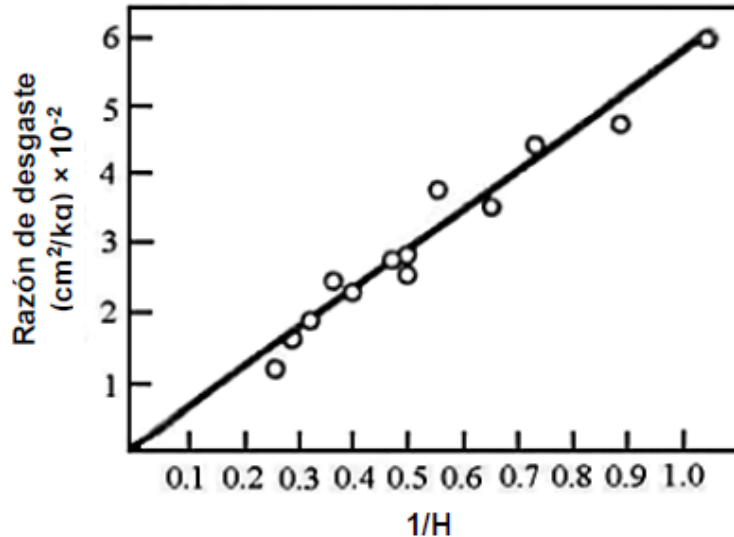


Fig. 1.14. Gráfica de la razón de desgaste en relación con el recíproco de la dureza (Sarkar, 1990).

Puesto que al incrementar la velocidad de deslizamiento se produce un aumento de la temperatura de las superficies en contacto, lo cual favorece la formación de óxido. Un incremento en la temperatura significa también que la dureza del metal disminuye, por un aumento en la razón de desgaste. Esto sucede así, si la temperatura de las superficies en contacto es suficientemente elevada. Se sabe que a velocidades muy altas se produce la fusión de las superficies en contacto, efecto que se acentúa si el punto de fusión y la conductividad térmica del material son bajos.

Sin embargo, el efecto general de incrementar la velocidad de deslizamiento es causar una reducción en la razón de desgaste lo que se demuestra en un estudio detallado del desgaste de latón 60/40 sobre acero en un intervalo de velocidades de 0.01 a 500 cm/s utilizando una máquina de espiga sobre disco. En la Fig. 1.15 se presentan variaciones de razón de desgaste con una carga de 22.5 kg aplicándole velocidad y se aprecia un decremento seguido de un incremento en la razón de pérdida de metal cuando se sobrepasa una velocidad ~100 cm/s. Hirts y Lancaster observaron la razón

de transferencia de metal por medio de una técnica de trazadores radiactivos y en la Fig. 1.15 se presenta que ésta equivale a la razón de desgaste. En otras palabras, el mecanismo básico del desgaste no cambia cualquiera que sea la velocidad de deslizamiento; esto es, se transfiere metal de la espiga al disco y a partir de esta capa depositada se forman residuos de desgaste. Para determinar si esto es por el efecto de un incremento de temperatura, se realizó una serie de experimentos en los cuales la espiga se enfrió con agua.

Así, en la Fig. 1.16 se presenta que en ese caso la razón de desgaste continuó disminuyendo. A la inversa, si el latón se aislaba térmicamente del soporte de la espiga, el aumento del desgaste a alta velocidad fue mayor que el obtenido cuando la espiga no se encontraba aislada o se la enfriaba con agua (Sarkar, 1990).

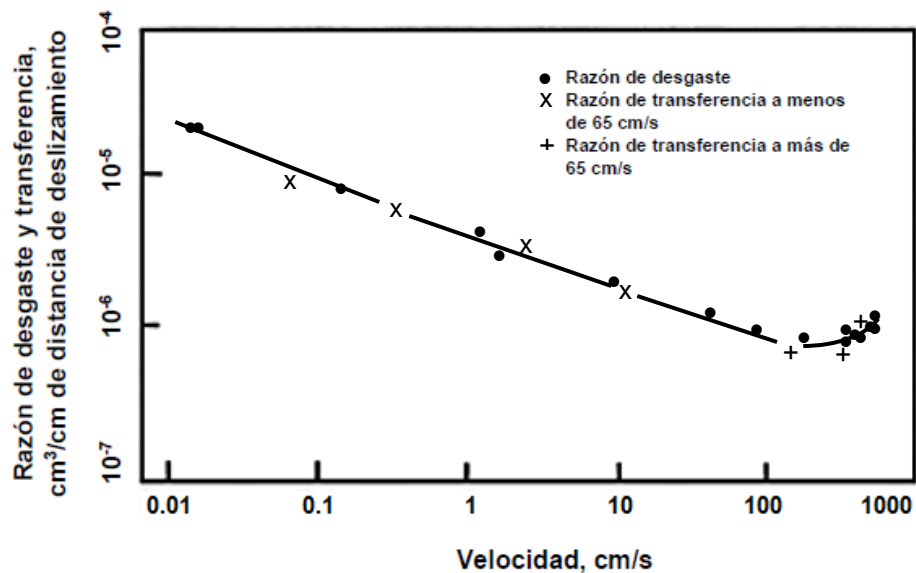


Fig. 1.15. Variación de la razón de desgaste y la transferencia de metal con la velocidad. Carga 22.5 kg (Sarkar, 1990).

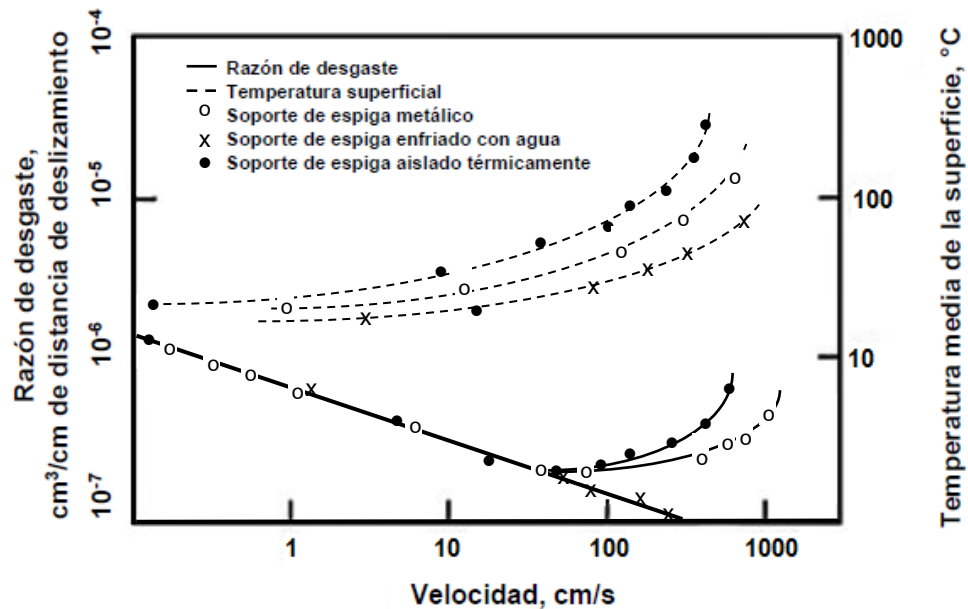


Fig. 1.16. Variación de la razón de desgaste y la temperatura superficial con velocidad para espigas aisladas térmicamente y enfriadas. Carga 3 kg (Sarkar, 1990).

1.1.10. EFECTO DE LA CARGA Y LA DISTANCIA DE DESLIZAMIENTO

Se ha descubierto que el desgaste se incrementa de forma casi proporcional a la carga. Sin embargo, esta relación se pierde con el calor de fricción. Si un metal como el cobre se presiona sobre el acero, cierta cantidad de cobre se transfiere al acero, de esa manera el área de la unión se podría estimar utilizando radiotrazadores. Rabinowicz demostró que la masa M de la fracción más grande de residuo se podría relacionar con la carga normal aplicada F por medio de la Ec. 1.21:

$$M = CF^\alpha \quad (1.21)$$

donde: C es una constante, y α tiene un valor de 0.3 para el cobre sobre acero, la naturaleza fraccionaria de α en la Ec. 1.21 demuestra que la masa del fragmento de desgaste sólo se incrementa a medida aumenta la carga. El

mismo estudio demostró que el efecto predominante de aumentar la carga aplicada fue que aumentara el número de uniones.

Lipson enunció como regla general que ante esfuerzos inferiores a $1/3$ BHN (aproximadamente en el punto de fluencia), el desgaste será independiente de la carga.

Se ha determinado que la tasa de desgaste es linealmente proporcional a la distancia recorrida. Los resultados de experimentos realizados por Piggott y Wilman, graficados en la Fig. 1.17 demuestran que el desgaste se inicia linealmente y después describe una curva exponencial.

En este tipo de experimentos cabe notar dos aspectos:

- 1) Los resultados obtenidos muestran que la magnitud del desgaste en el arranque inicial no se pueden determinar, y
- 2) La pendiente del estado estacionario de desgaste por el contrario si se puede obtener.

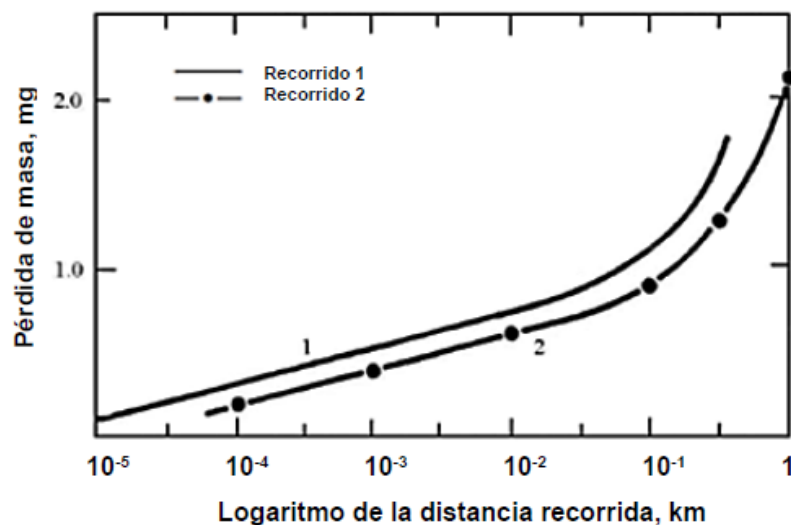


Fig. 1.17. Desgaste del acero vs. acero a 100 kg/cm^2 y con lubricante líquido parafínico (Sarkar, 1990).

1.2. ESTUDIOS DE DESGASTE

Existen diferentes tipos de ensayos que se realizan para el estudio de desgaste, de la misma forma, existen diferentes condiciones bajo las que se realizan dichos ensayos, a continuación se hará mención sobre las diferentes máquinas que se utilizan en los diferentes ensayos de desgaste y posteriormente sobre la normativa que rige dichos ensayos.

1.2.1. TIPOS DE MÁQUINAS PARA REALIZAR ENSAYOS DE DESGASTE

Existen diferentes tipos de máquinas para realizar ensayos de desgaste algunas de las principales son:

a) Espiga sobre mesa oscilante

Esta máquina está constituida por los siguientes elementos (ver, Fig. 1.18: una superficie plana capaz de moverse en las direcciones de la flecha (1), la espiga (2) está fija en un anillo (5), la carga normal se aplica por medio del tornillo (3) y ésta se evalúa por la deflexión del anillo, un brazo horizontal (4) fijo a una suspensión bifilar está también fijo al anillo (5) y el arrastre friccional provoca una deflexión que se puede medir.

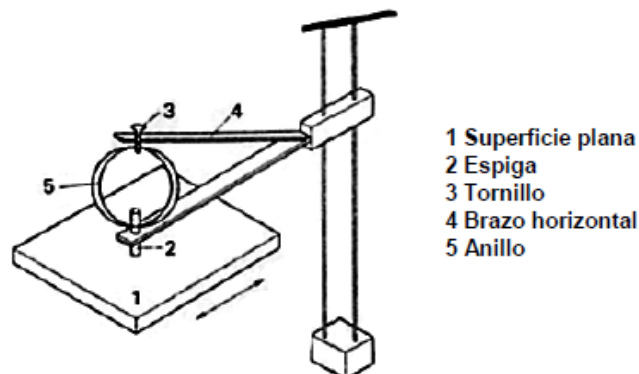


Fig. 1.18. Máquina de espiga sobre mesa oscilante (Sarkar, 1990).

b) Espiga sobre buje

En esta máquina (Fig. 1.19), la espiga (2) se fija a una barra horizontal de carga (3). Luego de sujeta la espiga se coloca sobre un buje rotatorio (1). La barra de carga está fija a un resorte (4) y el otro extremo está fijo a un soporte rígido (5). El arrastre friccional hace que el resorte se estire y éste mueve una aguja (6) la cual se encuentra unida a un trozo de hierro suave suspendido en un campo magnético. La deflexión de la aguja debido a la fricción hará que el núcleo se mueva provocando un cambio de fuerza del campo inducido. La señal resultante se puede amplificar y registrar.

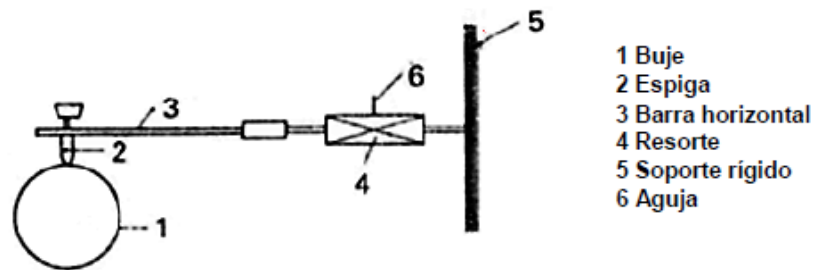


Fig. 1.19. Máquina de espiga sobre buje (Sarkar, 1990).

c) Cilindros cruzados

En esta máquina (Fig. 1.20) una espiga cilíndrica (1) se coloca sobre un cilindro giratorio de mayor diámetro. La espiga se encuentra acoplada a un resorte (2) el cual se deforma debido al arrastre friccional, dicha deformación es censada por un transductor (3).

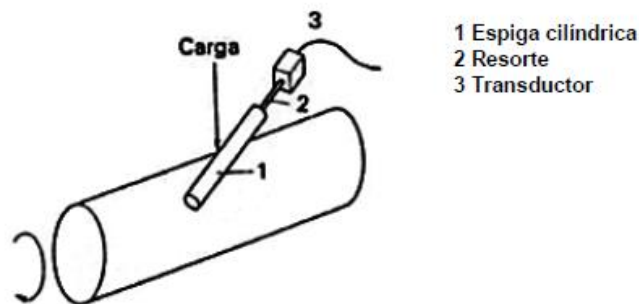


Fig. 1.20. Máquina de cilindros cruzados (Sarkar, 1990).

d) Espiga sobre cilindro

Esta máquina (Fig. 1.21) está constituida por una espiga de geometría cilíndrica o hemisférica (1) que descansa sobre un cilindro, que gira a determinadas rpm. La deflexión de la espiga debido a la fricción se mide por medio de transductores o calibradores de deformación acoplados a la sección reducida (2).

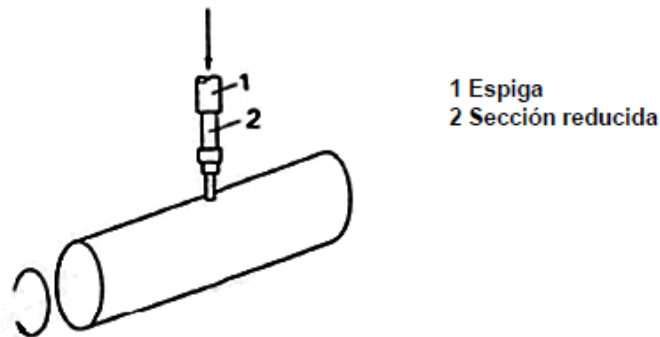


Fig. 1.21. Máquina de espiga sobre cilindro (Sarkar, 1990).

e) Máquina de cuatro bolas

El propósito principal de esta máquina es evaluar las propiedades antiadherentes de los aceites, pero también puede utilizarse para determinar la razón de desgaste, esta máquina funciona así: en un anillo se colocan tres bolas de acero de 12.5 mm de diámetro que están en contacto entre sí y una cuarta bola se fija al extremo de una barra vertical, la cual queda en contacto con las otras tres bolas inferiores. Una palanca que soporta un peso ajustable comprime las tres bolas estacionarias sobre la cuarta y el momento de torsión que se transmite se mide durante la rotación de la barra vertical. El coeficiente de fricción se registra durante la prueba y se miden las huellas causadas por el desgaste sobre las tres bolas.

f) Máquina de discos

En la máquina de discos, se hace rotar un disco sobre otro, con una carga dada, tal como normalmente se hace para simular estudios de diseño de

engranés. Un disco se encuentra sobre un rodamiento rígido, mientras que el otro se sujeta a un dispositivo oscilante.

g) Máquina de espiga sobre disco

Esta máquina (ver, Fig. 1.22) es usada para pruebas de desgaste, en ella la espiga (1) se coloca perpendicularmente a un disco giratorio (2). Las variables que rigen las pruebas son la carga normal, la velocidad de deslizamiento, la atmósfera y la temperatura ambiente. La cantidad de desgaste puede establecerse pesando la espiga y/o disco en una balanza analítica.

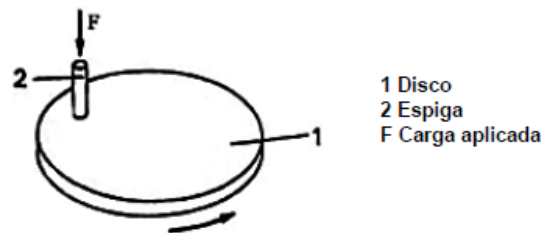


Fig. 1.22. Máquina de espiga sobre disco (Sarkar, 1990).

1.2.2. NORMAS ASTM PARA ENSAYOS DE DESGASTE

Los ensayos de desgaste con máquinas tipo espiga sobre disco están regidos bajo la norma de la ASTM G 99, en ella se describe un procedimiento de laboratorio para determinar el desgaste y el coeficiente de fricción de materiales durante el deslizamiento. Los materiales se ensayan en pares bajo condiciones no abrasivas.

Esta norma se encuentra referenciada en los siguientes documentos:

a) Normas de la ASTM:

E 122. Práctica para la selección del tamaño de la muestra para estimar una medida de calidad para un lote o proceso.

E 177. Práctica para el uso de los términos de precisión y tendencia en métodos de ensayo de la ASTM.

E 178. Práctica para relacionarse con las observaciones de los ensayos.

G 40. Terminología relacionada al desgaste y erosión.

b) Otras Norma.

DIN-50324. Ensayos de fricción y desgaste.

1.2.3. ENSAYO TIPO ESPIGA SOBRE DISCO

Para los ensayos de desgaste en máquinas tipo espiga sobre disco, se requieren dos especímenes. Se posiciona una espiga con una punta hemisférica, perpendicular al disco. La trayectoria del deslizamiento es un círculo en la superficie del disco. El plano del disco puede orientarse horizontalmente o verticalmente.

La espiga normalmente se coloca contra el disco a una carga dada por medio de un brazo o palanca a la cual se le agregan pesos. Se pueden usar otros métodos de carga, tales como: hidráulico o neumático.

Los resultados de desgaste se reportan separadamente como la pérdida de volumen en milímetros cúbicos para la espiga y el disco. La cantidad de desgaste es determinada midiendo dimensiones lineales apropiadas de ambos especímenes antes y después de la prueba, o pesando ambos especímenes. Si se usan medidas lineales de desgaste, el cambio de longitud o cambio de la forma de la espiga, y la profundidad o cambio de la forma de la huella de desgaste del disco (en milímetros) son determinados por cualquier técnica de metrología utilizando un perfilómetro; las medidas lineales de desgaste se convierten a volumen (en milímetros cúbicos) usando relaciones geométricas. Con frecuencia se usan las medidas lineales de desgaste puesto que la pérdida de masa es a menudo demasiado pequeña para medirse con precisión.

Los resultados de desgaste normalmente son obtenidos realizando los ensayos para una distancia de deslizamiento, carga y velocidad seleccionada. En las Tablas 1.1 y 1.2 se presentan las condiciones utilizadas para diferentes

ensayos y dependiendo del propósito que se tenga pueden seleccionarse otras condiciones para los ensayos.

Tabla 1.1. Característica para los especímenes para los ensayos de desgaste.

	Composición, % en peso	Microestructura	Dureza, HV10	Rugosidad ^A	
				Rz, μm	Ra, μm
Bola de acero (100Cr ₆) (AISI 52100) ^B Diámetro 10 mm	1.35 a 1.65 Cr 0.95 a 1.10 C 0.15 a 0.35 Si 0.25 a 0.45 Mn < 0.030 P < 0.030 S	Martensítica con baja cantidad de carburos y austenita	838 ± 21	0.100	0.010
Disco de acero (100Cr ₆) (AISI 52100) ^C Diámetro 40 mm	1.35 a 1.65 Cr 0.95 a 1.10 C 0.15 a 0.35 Si 0.25 a 0.45 Mn < 0.030 P < 0.030 S	Martensítica con baja cantidad de carburos y austenita	852 ± 14	0.952	0.113
Bola de Alúmina Diámetro 10 mm ^D	95% de Al ₂ O ₃ (adicionado con TiO ₂ , MgO y ZnO)	Alúmina Alfa Equigranular con muy pocas fases secundarias	1610 ± 101	1.369	0.123
Disco de Alúmina Diámetro 40.6 mm ^D	95% de Al ₂ O ₃ (adicionado con TiO ₂ , MgO y ZnO)	Alúmina Alfa Equigranular con muy pocas fases secundarias	1599 ± 144	0.968	0.041

^A Medido con perfilómetro. Rz es la rugosidad promedio entre cresta y valle. Ra es la media aritmética de las rugosidades.

^B Bolas estándar para rodamiento (SKF).

^C Espaciadores estándar para rodamiento de empuje (INA).

^D Fabricado por CICESA.

Los resultados de desgaste pueden ser graficados como volumen de desgaste versus distancia de deslizamiento utilizando varios especímenes para diferentes distancias de deslizamiento. Dichos gráficos pueden presentar relaciones lineales y no lineales entre volumen de desgaste y la distancia de deslizamiento en ciertas porciones de distancia de deslizamiento recorrida. La causa de dichas diferencias se debe al período de asentamiento y a la transición entre diferentes regiones de mecanismos dominantes de desgaste. La magnitud de tales períodos no-lineales depende de los limitantes del sistema de la prueba, materiales, y condiciones de la prueba.

Los números entre paréntesis presentados en la Tabla 1.2 se refieren al total de datos obtenidos en los ensayos. De acuerdo con la norma de la ASTM E178, los datos más dispersos fueron identificados en algunos casos y descartados. Estos resultados fueron proporcionados por veinte laboratorios, en dichos resultados las cantidades calculadas (por ejemplo: la razón de desgaste) están dados solamente como valores promedio; los valores etiquetados NM se encontraron inferiores al límite reproducible de la medida.

Tabla 1.2. Resultados de los ensayos de desgaste.

Especimen	Resultados	Pares de especímenes			
		Acero sobre acero	Alúmina sobre acero	Acero sobre alúmina	Alúmina sobre alúmina
Bola	Diámetro de la huella de desgaste, mm	2.11 ± 0.27	NM	2.08 ± 0.35	0.3 ± 0.06
	Razón de desgaste, 10 ⁻³ mm ³	198	.....	186	0.08
	Numero de valores	102 (102)	.....	60 (64)	56 (59)
Disco	Diámetro de la huella de desgaste, mm	NM	0.64 ± 0.12	NM	NM
	Razón de desgaste, 10 ⁻³ mm ³	.....	480	.....	.....
	Numero de valores	.....	60 (60)	.....	.....
	Coefficiente de fricción	0.60 ± 0.11	0.76 ± 0.14	0.60 ± 0.12	0.41 ± 0.08
	Número de valores	109	75	64	76

^A Condiciones de los ensayos: F = 10 N; v = 0.1 m/s; T = 23 °C; Intervalo de humedad relativa 12–78%; Distancia de deslizamiento = 1000 m; Diámetro nominal de la pista de desgaste = 32 mm; Materiales: acero AISI 52100 y Alúmina α-Al₂O₃.

1.3. TRATAMIENTO TERMOQUÍMICO DE CEMENTACIÓN

Para lograr una mejoría en la vida útil de los elementos de máquinas sometidos a desgaste se pueden mejorar los siguientes aspectos como por ejemplo; trabajar a un carga de contacto baja o por otro lado, se puede utilizar uno de los métodos preferidos en la industria; el cual es producir componentes con la profundidad óptima de capa endurecida junto con un buen acabado superficial. El propósito de esta capa externa dura que se obtiene por cementación, carbonitruración, nitruración, entre otros; es proporcionar una

superficie con un alto límite de resistencia en una región vulnerable a la iniciación de grietas; en el presente apartado se hará énfasis al tratamiento termoquímico de cementación (Apraiz Barreiro, 1949).

1.3.1. CEMENTACIÓN DEL ACERO

Se denomina cementación o carburización al tratamiento termoquímico que consiste en el incremento por difusión de la capa superficial del acero con átomos de carbono a una temperatura entre 850 y 1000°C en un medio carburante. Siendo las temperaturas próximas a 900°C las más utilizadas (Apraiz Barreiro, 1949). Las piezas cementadas adquieren las propiedades definitivas después del temple y revenido a bajas temperaturas. La cementación y el tratamiento térmico posterior tienen como objetivo dar a la capa superficial una alta dureza, incrementar el límite de resistencia al desgaste y el límite de fatiga a cargas flexionantes, y conservar dúctil el núcleo (Askeland, 1998) y (Avner, 1988).

La cementación se emplea frecuentemente para endurecer ruedas dentadas de dimensiones medias, ejes de cajas de velocidades para automóviles, piezas de dirección, husillos y muchas otras piezas de máquinas. Las piezas se someten a la cementación después del mecanizado con un sobre espesor para el rectificado final definitivo hasta de 0.25 mm y con más frecuencia, con un sobre espesor para dicho rectificado final de 15 a 25 μm . El sobre espesor para el rectificado no debe superar un 25 a 30% del grosor de la capa cementada. Aunque algunas piezas son sometidas a la cementación después del mecanizado definitivo.

Así por ejemplo, los piñones de automóvil después de la cementación no se someten al rectificado de los dientes. En muchos casos la pieza sólo parcialmente se somete a la cementación y entonces las partes no sujetas a la cementación se protegen con una capa delgada de cobre (de 0.02 a 0.05 mm) que se deposita por procedimiento electrolítico o se aíslan con baños

especiales que contienen polvo de cuarzo, bórax, talco, caolín o polvo de amianto diluidos con vidrio líquido.

Para asegurar la estabilidad dimensional y calidad superficial, se recomienda que las piezas sean lavadas antes de la cementación o nitro-cementación con una solución de soda cáustica de uso industrial del 3 al 5%; introduciendo las piezas en un depósito para un baño de unos 5 min, luego se secan; todo el procedimiento deberá hacerse con guantes para evitar tocar las piezas con las manos con el fin de que no se contaminen de nuevo.

Durante la cementación, al igual que cualquier otro caso de tratamiento termoquímico, tiene lugar la interacción entre el medio que lo rodea y la pieza a tratar y, se desarrolla así la difusión del carbono en la pieza. Las características de la transferencia de masa dentro de los medios sólidos, líquidos y gaseosos, así como las transformaciones físicas en el proceso de formación de la capa de transición, son parámetros de importancia de la cementación del acero. Después de la cementación y del tratamiento térmico posterior, para incrementar la resistencia a la tracción a carga máxima.

De lo anterior se puede decir que los resultados de la cementación dependen de los siguientes factores:

- a) Composición del acero.
- b) Composición del medio carburante.
- c) Régimen de cementación (temperatura de calentamiento y tiempo de permanencia).
- d) Tratamiento térmico posterior a la cementación.

La cementación se desarrolla siempre, no por un carbono en estado molecular, sino por carbono en estado atómico, debido a que este último es el único capaz de difundir dentro de la red del hierro.

En el proceso de cementación se utilizan diferentes medios carburantes para difundir el carbono en la capa superficial del acero, de acuerdo a lo anterior, la cementación se puede clasificar en tres tipos: sólida, líquida y gaseosa.

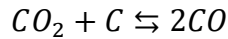
1.3.2. CEMENTACIÓN CON CARBURANTES SÓLIDOS

Como cementantes sólidos se emplea principalmente el carbón vegetal seco de abedul o de roble en granos pequeños con la adición de un agente activado. A los cementantes se les agregan los denominados agentes de activación cuya misión es la de acelerar el proceso. Entre los agentes activadores interesan principalmente los carbonatos siendo el más utilizado el carbonato de bario (BaCO_3) (Apraiz Barreiro, 1949). El carbón vegetal se mezcla con el carbonato de bario en una relación que corrientemente oscila entre 60:40 (60 % en peso de carbón vegetal y 40% en peso de carbonato de bario) hasta 90:10. La mayor proporción de carbonato de bario se emplea preferentemente cuando se tiene que alcanzar grandes profundidades de capa cementada. La acción del agente activador puede ser debido a su influencia en la formación de óxidos de carbono. Durante la carburización el carbón vegetal y los activadores, tales como el carbonato de bario, calcio o sodio, suministran, mediante sus reacciones a alta temperatura, el carbono en forma atómica.

En el proceso de cementación tienen gran importancia los porcentajes de los distintos compuestos gaseosos de carbono que existen en el medio que rodea al acero. Los gases procedentes de cementantes sólidos son principalmente monóxido de carbono (CO) y bióxido de carbono (CO_2). El primero actúa a altas temperaturas por cesión de carbono, que se difunde en el hierro, mientras que el bióxido de carbono cede oxígeno que se combina con el carbono del acero, por lo que se descarbura la superficie. Con una determinada relación de monóxido de carbono a bióxido de carbono en el medio que rodea al acero se tiene un comportamiento neutro de los gases, es decir que no se produce carburización ni descarburización. La proporción de monóxido de carbono y bióxido de carbono con la que se consigue este comportamiento neutro depende primeramente de la temperatura y luego del contenido en carbono del acero. Si el efecto sobre el acero entre el monóxido de carbono, el bióxido de carbono y el carbón incandescente en la caja cerrada no se

considera, se establece un equilibrio llamado Equilibrio de Boudouard que es función de la temperatura.

La reacción química se desarrolla como sigue:



Esto significa que existiendo gran porcentaje de CO₂, éste reacciona con el carbón incandescente y una parte de CO₂ se transforma con el carbono en CO. Si se trabaja partiendo de las temperaturas comunes para la carburización resultan, los contenidos en CO y CO₂ (ver Tabla 1.3).

Tabla 1.3. Contenidos de CO y CO₂ en la fase gaseosa, en función de la temperatura con un cementante sólido (sin considerar la cementación del acero).

Temperatura, °C	Contenidos aprox.	
	%CO	%CO ₂
800	88	12
900	97	3
1000	99.96	0.04

Tabla 1.4. Condición de equilibrio entre CO y CO₂ y el contenido de carbono superficial del acero a dos temperaturas diferentes.

Temperatura, °C	Contenidos		
	%C del acero	%CO aprox.	%CO ₂ aprox.
800	0.4	70	30
800	1.2	88	12
900	0.4	92	8
900	1.2	96	4

Por la presencia del acero se tiende a formar un equilibrio entre la atmósfera gaseosa y el contenido de carbono del acero. En la Tabla 1.4 se presentan las condiciones de equilibrio en varios casos.

Asumiendo que el equilibrio no se altera por condiciones externas, como por ejemplo cambio de presiones, resulta de estas condiciones una relación entre el contenido de carbono de la superficie del acero y la atmósfera gaseosa. Así $\approx 900^\circ\text{C}$ de temperatura puede existir un equilibrio entre este medio y un acero con $\approx 1.2\%$ de carbono, en cuyo caso no tendrá lugar una carburización ni

una descarburización; es decir, que no se produce ninguna reacción en absoluto. Aunque, si a esta temperatura se tratase un acero que contiene menos del 1.2% de C, se produciría entonces una carburización. En cambio, en un acero para herramientas conteniendo por ejemplo 1.4% de C, durante su tratamiento no tendrá lugar una carburización sino una descarburización, hasta que su superficie llegue a un contenido del 1.2% C. La influencia del contenido de CO y CO₂ de los gases, la temperatura y el contenido de carbono del acero, se presentan en la Fig. 1.23, en la cual se indica con una curva discontinua en forma de S el equilibrio Boudouard; así, como los equilibrios de la atmósfera cementante con el contenido de carbono del acero (líneas continuas de la parte superior derecha de la Fig. 1.23).

Con el ejemplo de un acero que contiene 0.1% de C se explicará el uso de este diagrama para una apreciación práctica de los procesos de cementación:

Así, Un acero para cementación con 0.1% de C está a una temperatura de 900 °C, en equilibrio con gas cementante que contiene un 75% de CO. Esto se desprende de la intersección de la línea de 0.10 % de C con la línea de temperatura para 900 °C.

La altura del punto de intersección, medida en la ordenada, indica el contenido de CO (izquierda) y CO₂ (derecha). Si se aumenta, por ejemplo, hasta un 90% el contenido CO de los gases y a 900 °C el acero admitirá hasta ~0.4% de C (línea 0.4 de C). Con el mismo medio del horno la absorción de carbono por el acero deberá ser mayor a temperatura baja, y menor a una temperatura más alta. Así, a 800 °C y 90% de CO en el medio, la absorción de carbono en la superficie de la pieza podrá aumentar, hasta 0.60% de C y a 820 °C, hasta ~0.9% de C.

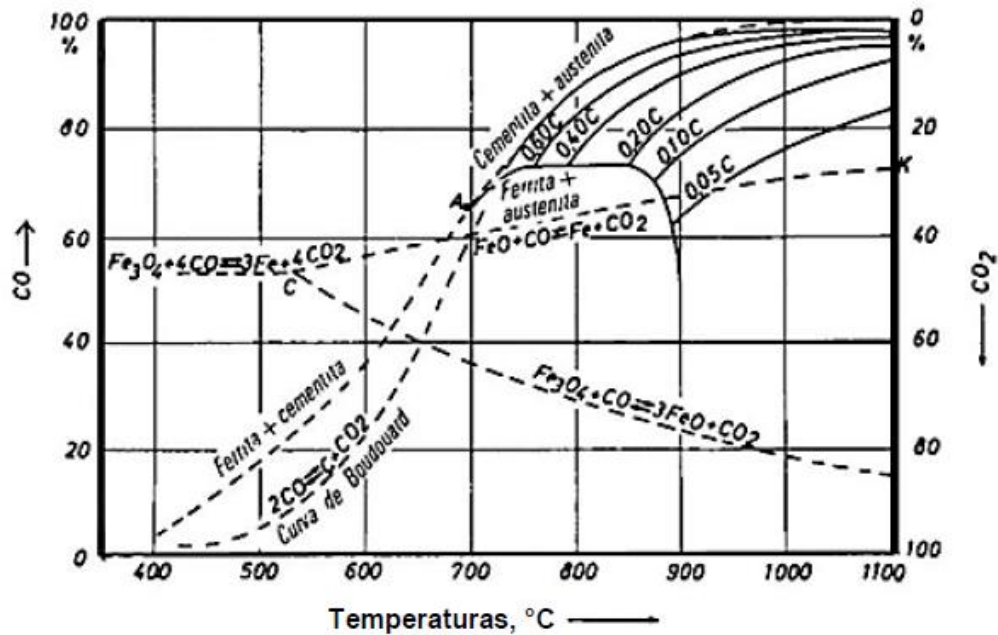


Fig. 1.23. Relación entre el contenido de CO de la atmósfera carburante, la temperatura y contenido de carbono del acero.

En cambio, a una temperatura de 1060 °C, la absorción de carbono disminuye hasta un 0.1% de C; es decir, que a esta temperatura y con el medio del horno no se produce una cementación en un acero con 0.1% de C. Si se aumentase más la temperatura, descendería entonces el equilibrio hasta menos del 0.1% de C en el acero; es decir, el acero cede carbono y se descarburará. A medida que va disminuyendo el porcentaje de CO en el medio del horno, la descarburización se inicia a una temperatura sensiblemente menor. Así, con un 80% de CO, un acero con 0.1% de C se descarbura por encima de unos 940 °C.

La línea C-K (ver, Fig. 1.23) representa la transición entre la descarburización y la oxidación. Esto significa que el acero que contiene 0.1% de C a 900 °C, en el medio del horno con más de ~75% de CO lo carbura, de CO hasta ~67% (corte de la línea C-K con la línea de 900 °C, ver Fig. 1.23) lo descarbura, y por debajo de ~67% de CO lo oxida.

Para la cementación es importante, en primer lugar, la velocidad a la que el carbono es suministrado por el agente generador de carbono, y en segundo

lugar por la velocidad a la que el carbono es transferido en el acero por difusión desde la superficie hasta el interior de la pieza. Si el suministro de carbono es muy alto (gran contenido de CO) y la velocidad de difusión en el acero es reducida, se produce, una alta concentración de carbono en la capa superficial de la pieza y las transiciones en el contenido de carbono desde la superficie hasta el núcleo son bruscas.

Es deseable evitar concentraciones de carbono mayor que 0.86% de C, porque se forma cementita libre en el acero. La cementita formada se deposita en los límites de grano, lo cual disminuye considerablemente la tenacidad de la capa superficial; por lo que, después de haber realizado el temple puede producirse un desprendimiento de la capa cementada delgada. Con pequeñas profundidades de cementación, décimas de milímetros y haciendo uso de los aceros corrientes de bajo carbono, no se puede contar normalmente con un incremento de contenido de carbono por encima de 0.86% de C, aunque se apliquen productos muy carburantes; es decir, que suministren rápidamente carbono, esto se debe a que la superficie está saturada de carbono. Por otro lado, si se requiere una cementación de mayor profundidad, la velocidad de difusión del carbono en la superficie exterior es amortiguada por el hecho de que el gradiente de concentración disminuye hacia el interior de la pieza a causa del carbono absorbido. Se producen así fuertes concentraciones de carbono en la superficie exterior, lo cual es cementita. Hasta ~1 mm de profundidad de cementación será siempre posible evitar contenidos de carbono por encima de 0.86% de C. A mayores profundidades de cementación habrá que adoptar cementantes de efecto más suave. Aunque, a profundidades mayores de unos 3 mm, incluso empleando cementantes suaves, no habrá modo de impedir que se forme cementita en la capa superficial, prescindiendo de que apenas se emplean ya cementantes de acción suave, porque en este caso se necesitarían tiempos demasiados largos.

Los tiempos de cementación están condicionados principalmente por la temperatura de operación y, en menor medida, por el cementante. Con los

polvos cementantes de carbón vegetal y carbonato de bario, para una profundidad de cementación de 1 mm y a ~900 °C de temperatura, se tiene que contar con una duración de 4 h. En la primera hora la zona cementada llegará a una profundidad de 0.35 mm, aumentando luego más despacio con el tiempo. Cuando se trata de grandes profundidades los tiempos aumentan considerablemente. Así, para 1.5 mm de profundidad de cementación el tiempo necesario es aproximadamente el doble que el que precisa para llegar a 1 mm. Así, junto al encarecimiento del proceso debido a los largos tiempos de operación se debe tener presente también el crecimiento del grano que aumenta con el tiempo, lo cual origina una reducción de la tenacidad. En vista del crecimiento de grano, que aumenta cada vez más con la temperatura, antes se aplicaban temperaturas de carburización relativamente bajas (830 a 850 °C). Pero los tiempos más largos que se requieren a bajas temperaturas conducen prácticamente a los mismos resultados respecto al tamaño de grano, que si se trabaja con temperaturas más altas y tiempos más cortos para obtener iguales profundidades de carburización. Dado que esto último reporta mayores economías, actualmente se trabaja normalmente a temperaturas superiores en el orden de 900 a 950°C, y para mayores profundidades de cementación se llega incluso a 1000 °C. Aparte de esto, la temperatura puede alterar la pendiente de la disminución de carbono en la zona de transición desde la capa superficial cementada hasta el núcleo de la pieza.

En cuanto la temperatura sea más alta y mayor sea la velocidad de difusión, más suave es el paso de contenido de carbono desde la superficie hasta el núcleo. De este modo, aplicando temperaturas de cementación más altas resultarán mucho más pequeñas las tensiones entre capas superficiales y núcleo durante el temple posterior. La indicación del tiempo, utilizando cementantes sólidos, se refiere corrientemente al tiempo de permanencia propiamente dicho durante el cual las piezas están a la temperatura de cementación. Dado que los cementantes sólidos son muy malos conductores de calor y el material a cementar tiene que estar bien rodeado por los cementantes

con el fin de evitar irregularidades se necesitan entonces tiempos de calentamientos largos hasta que las piezas lleguen verdaderamente a la temperatura necesaria.

1.3.3. EJECUCIÓN DE LA CEMENTACIÓN CON CARBURANTES SÓLIDOS

Los materiales cementantes tienen que estar bien secos, ya que si se emplean cementantes húmedos se puede producir corrosión en las superficies de las piezas. Así, se habrá que calentar los cementantes al aire, por ejemplo en tambores de chapa dejando libre una pequeña abertura. Además, el contenido de azufre de los cementantes debe ser lo más bajo posible. También, se tiene que procurar que el carbón vegetal no esté en trozos demasiado grandes, pues cuanto menor es el tamaño de granos tanto mayor puede ser la superficie de reacción y mayor la velocidad a la que se desarrolla.

En el mismo sentido dado que al calentar en cajas no se conoce la temperatura exacta de la pieza y las reacciones empiezan antes de alcanzar las temperaturas de carburización elegidas, es conveniente incorporar dos a tres especímenes de alambres del mismo grosor u otro de composición similar a la de las piezas. Estos alambres se introducen por el centro de la tapadera de la caja de manera que puedan ser retirados fácilmente durante la cementación. Estos alambres se retiran a distintos intervalos de tiempo, se enfrían bruscamente y se cortan. Así esta muestra es preparada y atacada químicamente para determinar la profundidad de cementación. Por medio de estas pruebas se puede conseguir con bastante exactitud la profundidad de la capa cementada deseada.

Es importante citar que el empaquetamiento de las piezas se tiene que hacer de manera que exista suficiente cantidad de mezcla carburante y que se compense el descenso por el consumo de dicha mezcla. Así, para lograr mayores profundidades de cementación se debe procurar que exista la suficiente cantidad de agente cementante. Las partes de las piezas que no se

requieren cementar se cubrirán con una pasta o con barro. Sin embargo, para tener mayor protección contra la cementación (no tratándose de tiempos demasiado largos) es más ventajoso un recubrimiento de cobre. Después del empaquetado se coloca una tapa sobre las cajas de cementación y las juntas se sellan con barro, este proceso se detalla más específicamente en la sección 2.5. En la Fig. 1.24 se presenta la influencia de la temperatura y el tiempo de permanencia sobre la profundidad de cementación con carburante sólido.

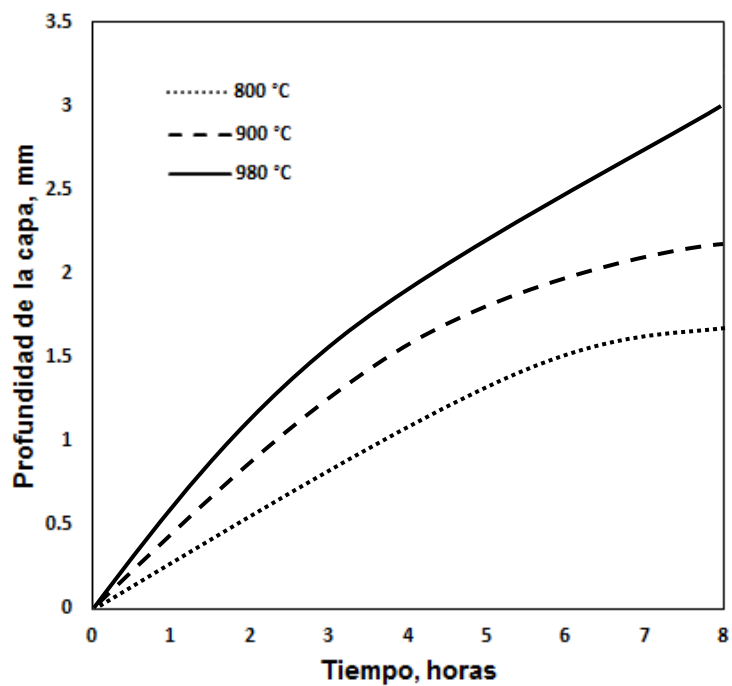


Fig. 1.24. Efecto de la temperatura y del tiempo de permanencia sobre la profundidad de cementación con carburante sólido (Carbón + 40% de BaCO₃).

A manera de recordatorio, se hace mención que durante el desarrollo de este capítulo se presentó información básica sobre los conceptos referentes al desgaste, la realización de su estudio y sobre el tratamiento termoquímico de cementación. Sobre esta base será sustentado el siguiente capítulo referente al diseño experimental de un ensayo de desgaste tipo espiga sobre disco utilizando un acero AISI O1 y un AISI 1020 cementado.

2. DISEÑO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe cada etapa a realizar en el desarrollo del estudio de desgaste tipo espiga sobre disco, dicho proceso comprende en primera instancia el maquinado de las probetas. Se fabricarán 36 discos de 50 mm de diámetro y 10 mm de espesor de acero AISI 1020 y 18 espigas de sección plana de 4 mm de diámetro y longitud de 25 mm de acero AISI O1.

También se presentan las especificaciones del tratamiento termoquímico de cementación que se realizará en 18 de los 36 discos, incluyendo la descripción de su respectivo post tratamiento térmico. Al mismo tiempo todas las espigas de acero AISI O1 se someterán a un temple y revenido a baja temperatura.

Se presentan las combinaciones de variables bajo las que se realizarán los ensayos de desgaste, estableciendo 3 cargas diferentes y 2 distancias de deslizamiento diferentes para cada condición de material base y cementado.

Finalmente se describe el proceso de determinación de dureza en los discos cementados y la medición del espesor de la capa cementada. Cabe mencionar que durante el desarrollo de este capítulo se toman en consideración los recursos que se necesitarán para ejecutar cada una de las etapas.

2.1. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En la Fig. 2.1 se presenta el diagrama de flujo de la metodología experimental a realizar, es importante conocer los pasos que se realizarán y su secuencia. Como se explicó en la introducción del presente capítulo; se inicia con el dimensionamiento de las probetas para posteriormente realizar su respectivo maquinado, luego se establecen los procesos propios de los tratamientos termoquímicos y térmicos, dentro de los cuales se incluyen etapas de limpieza y finalmente la ejecución de los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco bajo las diferentes condiciones de estudio.

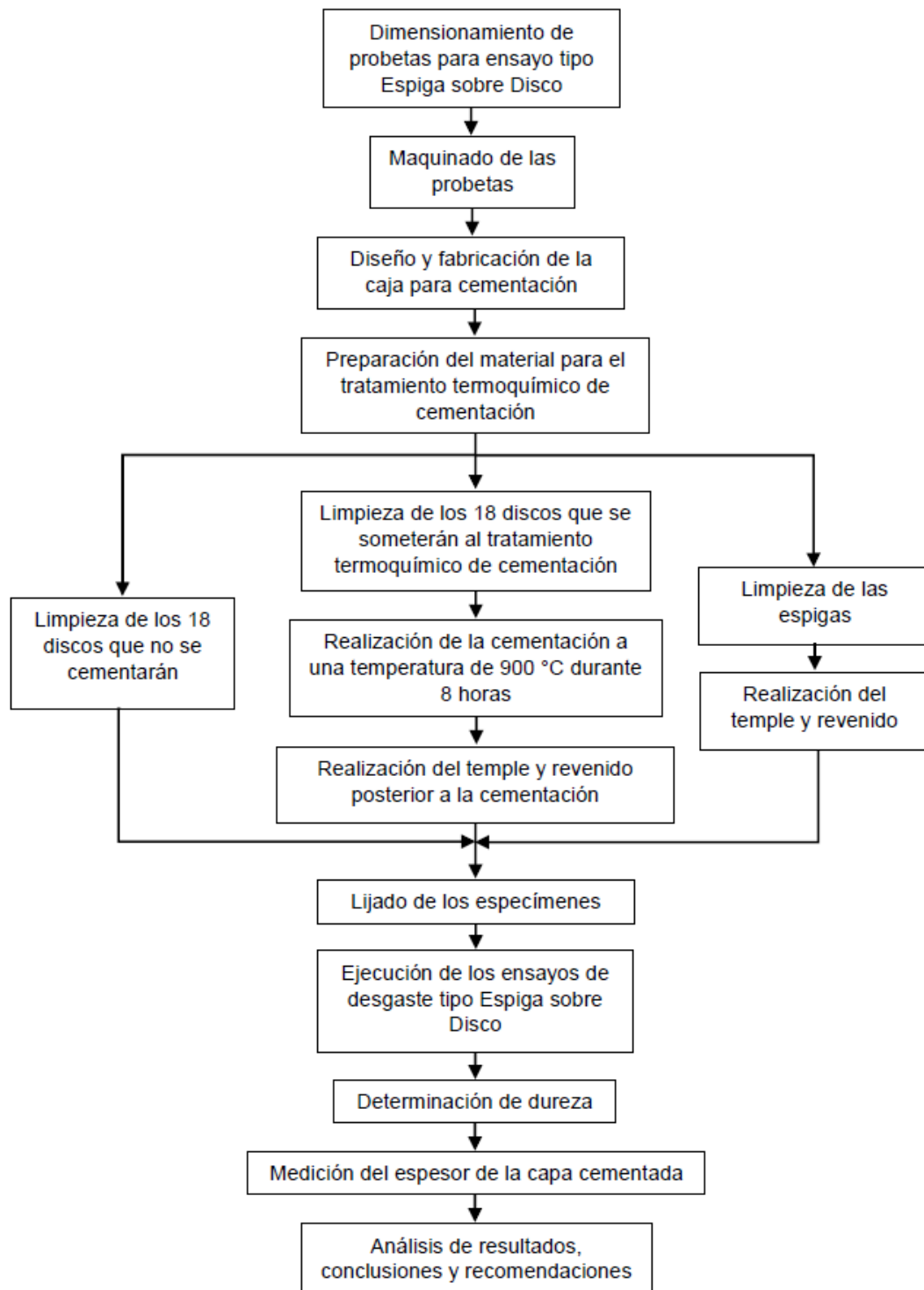


Fig. 2.1. Diagrama de flujo de la metodología experimental.

2.2. DIMENSIONAMIENTO DE LOS DISCOS Y ESPIGAS PARA LOS ENSAYOS DE DESGASTE

El dimensionamiento de las probetas se realiza tomando en consideración el manual del módulo para ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco marca GUNT, modelo TM 260.3. Dicho aparato se utiliza con el módulo básico de estudios tribológicos de la misma marca, modelo TM 260.

En la Fig. 2.2 se presenta las dimensiones tanto del disco de acero AISI 1020 como de la espiga de acero AISI O1; el disco posee un diámetro de 50 mm y un espesor de 10 mm, cuenta con un chaflán en ambas caras de 1 mm a 45° y un agujero de 4.37 mm; dicho agujero permite la sujeción del disco al vaso portador del mismo, mediante un perno, existe holgura entre el perno y el disco, por lo que no es necesario realizar un ajuste. La espiga posee un diámetro de 4 mm y una longitud de 25 mm.

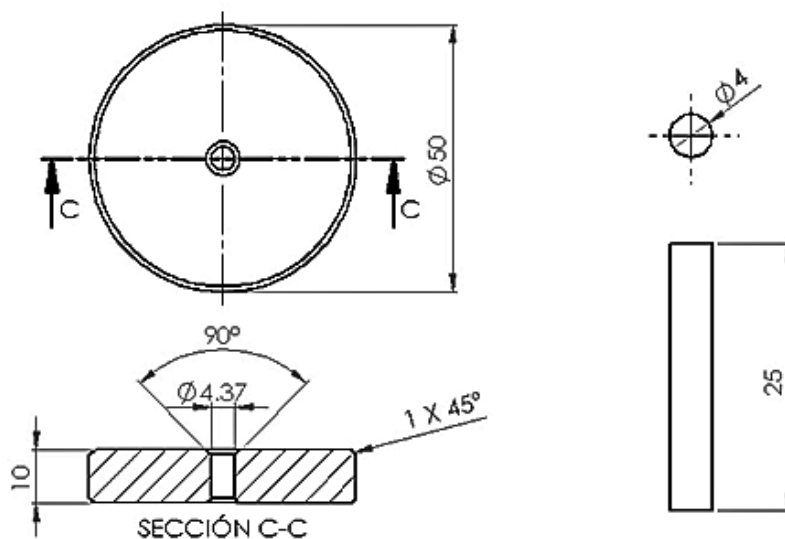


Fig. 2.2. Dimensiones de los especímenes a utilizar en el ensayo tipo espiga sobre disco. Cotas en mm.

2.3. MAQUINADO DE LAS PROBETAS

Los discos de acero AISI 1020 y las espigas de acero AISI O1 se maquinan a partir de una barra cilíndrica de diámetro de 50.80 mm (2 pulg) y de 12.7 mm (1/2 pulg) respectivamente. En estado de entrega, la composición química de cada barra corresponde a la presentada en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Composición química de los aceros a estudiar en condiciones de entrega.

Aleación \ Elemento	% en peso								
	C	Mn	Si	P	S	Cr	W	V	Fe
AISI 1020	0.18-0.22	0.60	0.20	0.22	0.11				Balance
AISI O1	0.95	1.00	0.50	0.030	0.030	0.50	0.50	0.030	Balance

El maquinado de las probetas se lleva a cabo en un torno convencional marca COMEC, modelo TGA 180 N, que se encuentra en la Unidad Productiva Metal Mecánica, de la Escuela de Ingeniería Mecánica, el cual se puede observar en la Fig. 2.3.



Fig. 2.3. Torno convencional COMEC, TG 180 N.

El maquinado de los discos se inicia realizando un proceso de cilindrado para obtener el diámetro de 50 mm a partir de los 50.80 mm originales de la barra. Luego se procede a realizar cortes sobredimensionados de los especímenes a 15 mm de espesor, utilizando una sierra industrial (Fig. 2.4); posteriormente, en el torno se refrentan ambas caras y luego se perfora un agujero a través del disco con una broca de 4.36 mm (11/64 pulg). Cada disco finalizado se coloca en un recipiente con aceite para protegerlos de la oxidación.



Fig. 2.4. Sierra industrial.

2.4. DISEÑO DE LA CAJA PARA CEMENTACIÓN

El diseño de la caja para cementación se basa en los resultados obtenidos por (Artiga, Hernández, & Mezquita, 2002), en la sección 2.5 se especificarán dichos resultados, según dicha investigación la condición óptima para realizar el tratamiento termoquímico de cementación se produce con una distancia de separación entre los discos de 7.50 mm. Tomando en consideración dicha distancia de separación óptima entre las caras de los

discos a cementar y las dimensiones de estos se estableció un diseño para el interior de la caja con las dimensiones que se presentan en la Fig. 2.5.

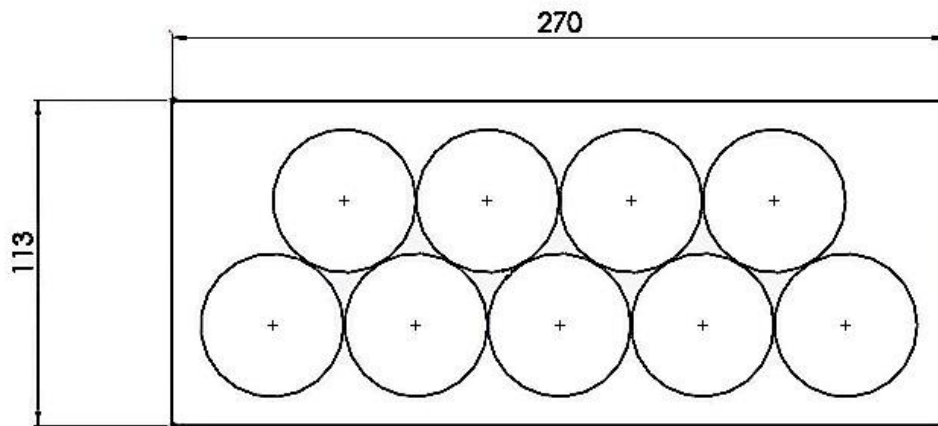


Fig. 2.5. Vista en planta de la caja de cementación. Cotas en mm

En la Fig. 2.5 se presenta una vista en planta de la caja de cementación, al fondo de ésta se colocan 9 discos en la disposición mostrada, los discos serán cubiertos por la mezcla carburante (la cual se describirá en la sección 2.5.1.) propiciado así una capa con un espesor de 7.50 mm, la distancia entre caras recomendadas para un proceso óptimo (Artiga, Hernández, & Mezquita, 2002). Tras obtener el espesor mencionado se dispondrán los 9 discos restantes con el mismo arreglo presentado en la Fig. 2.5.

Tomando en consideración que la caja para cementación tiene que estar herméticamente sellada, se agrega un canal en el contorno de la caja para que el contacto entre la tapadera y la misma pueda ser llenado de barro. En la Fig. 2.6 se presenta el diseño externo de la caja y su tapadera.

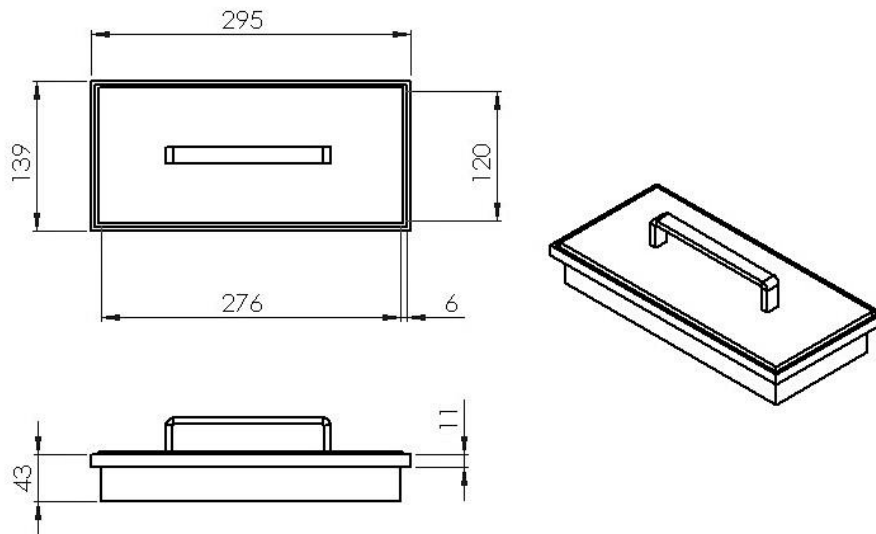


Fig. 2.6. Dimensiones externas de la caja y su tapadera. Cotas en mm.

2.5. TRATAMIENTO TERMOQUÍMICO DE CEMENTACIÓN

Tomando en consideración los resultados del trabajo de Artiga, Hernández, & Mezquita (2002) se construyó la Tabla 2.2 en la que se correlacionan el espesor de capa cementada, el tipo de mezcla y la distancia entre probetas para un proceso de 8 horas.

Tabla 2.2. Espesores de capa cementada para diferentes mezclas y distancias de separación entre probetas (Artiga, Hernández, & Mezquita, 2002).

Mezcla	Distancia 1	Distancia 2	Distancia 3	Distancia 4
M1	0.86	0.72	0.78	0.8
M2	0.9	0.98	0.9	1.0
M3	0.67	0.78	0.96	1.0

Donde M1, M2 y M3 corresponden a proporciones de carbón vegetal y carbonato de bario de 90:10, 80:20 y 70:30 porcentaje en peso, respectivamente; y Distancia 1, 2, 3 y 4 corresponden a separaciones de probetas de 5, 7.5, 10 y 12.5 mm, respectivamente. En la Fig. 2.7 se presenta el

gráfico de superficie de respuesta de la Tabla 2.2. A partir de dicho gráfico se determinó que las condiciones óptimas para realizar el tratamiento termoquímico de cementación se obtiene con una mezcla de proporción de carbón vegetal y carbonato de bario de 80:20 porcentaje en peso para una distancia de separación entre probetas de 7.5 mm.

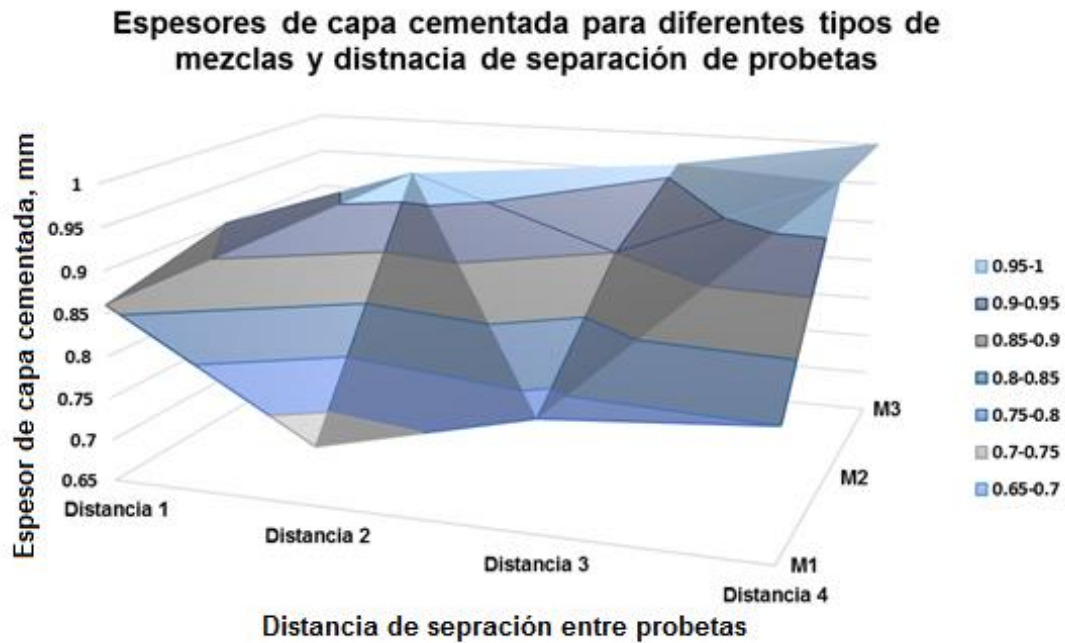


Fig. 2.7. Gráfica de los diferentes espesores de capa cementada para determinado tipo de mezcla y distancia de separación entre probetas para un tratamiento de 8 horas.

El proceso que se sigue en el experimento consta de las siguientes etapas:

- Limpieza de probetas
- Preparación de la mezcla carburante
- Distribución de probetas dentro de la caja
- TTQ-C de las probetas
- Etapa posterior al proceso de cementación

2.5.1. LIMPIEZA DE PROBETAS

Previo a la cementación, es necesario eliminar cualquier tipo de impureza que se encuentre presente en la superficie de las piezas; el primer paso es un lavado con agua y jabón para remover los residuos del aceite en el que estuvieron guardadas, tras este paso inicial, los especímenes se secan con aire caliente para propiciar la remoción total de la humedad. Posteriormente el proceso que se sigue para asegurar la eliminación de impurezas es un lavado con soda cáustica al 5%, los especímenes se depositan en el recipiente que contiene la solución y se mantienen sumergidos durante 5 minutos, posteriormente, los discos son retirados y se vuelven a secar con aire caliente.

2.5.2. PREPARACIÓN DE LA MEZCLA CARBURANTE

A partir de la Fig. 2.7 se determinó que las condiciones óptimas para realizar el tratamiento termoquímico de cementación se obtiene con una mezcla de proporción en peso de carbón vegetal y carbonato de bario de 80:20 porcentaje en peso.

Previo al proceso de cementación, se colocan los 18 discos dentro de la caja y luego se llena con carbón para obtener de esta forma el peso del mismo a utilizar. El peso de carbón obtenido es de 230.3 g, el cual corresponde al 80% del peso de la mezcla carburante total, por lo tanto, el 100% de la mezcla corresponde a 287.88 g y por lo tanto el porcentaje de carbonato de bario a utilizar corresponde a 57.58 g.

2.5.3. DISTRIBUCIÓN DE PROBETAS DENTRO DE LA CAJA

Cómo se presentó en la Fig. 2.7 las condiciones óptimas para realizar el tratamiento termoquímico de cementación se obtienen con una distancia de

separación entre probetas de 7.50 mm. En la Fig. 2.5 se presenta de forma esquemática la posición en la que 9 de los 18 discos a cementar serán colocados. El proceso de distribución de las probetas consiste en colocar los primeros 9 discos en el fondo de la caja y luego agregar la mezcla carburante hasta alcanzar la distancia de separación establecida, tras llegar a dicho nivel se tiende a compactar y a verificar que se ha dejado una superficie uniforme para poder colocar los otros 9 discos restantes y posteriormente agregar el resto de la mezcla carburante, cerrar la caja y agregar el barro en los extremos de la tapadera para asegurar un sellado hermético.

2.5.4. TRATAMIENTO TERMOQUÍMICO DE CEMENTACIÓN DE LAS PROBETAS

La caja de cementación se ubica exactamente al centro de la bandeja del horno, a una temperatura de 900 °C. El tiempo de permanencia de la caja dentro del horno es de 8 horas, tiempo para el que se obtuvieron los resultados de la Tabla 2.2 (Artiga, Hernández, & Mezquita, 2002).

2.5.5. ETAPA POSTERIOR DEL PROCESO DE CEMENTACIÓN

Todas las probetas se llevan desde la temperatura de cementación hasta la temperatura ambiente, por un enfriamiento lento dentro del horno.

2.6. POST TRATAMIENTO TÉRMICO

Después de finalizar el tratamiento termoquímico de cementación se realiza un post tratamiento térmico de temple y revenido. Después que las piezas en la caja se enfrían lentamente, se sacan de la caja y se vuelve a

calentar para realizar el temple a una temperatura de 875 °C la cual corresponde a la temperatura de temple de la zona superficial rica en carbono. El enfriamiento se hace en aceite para posteriormente volver a colocar la pieza en el horno para el proceso de revenido a 200 °C para que finalmente la pieza se enfríe hasta la temperatura ambiente al aire libre. En la Fig. 2.8 se presenta la curva de Temperatura – tiempo en el que se esquematiza el post tratamiento térmico de los discos.

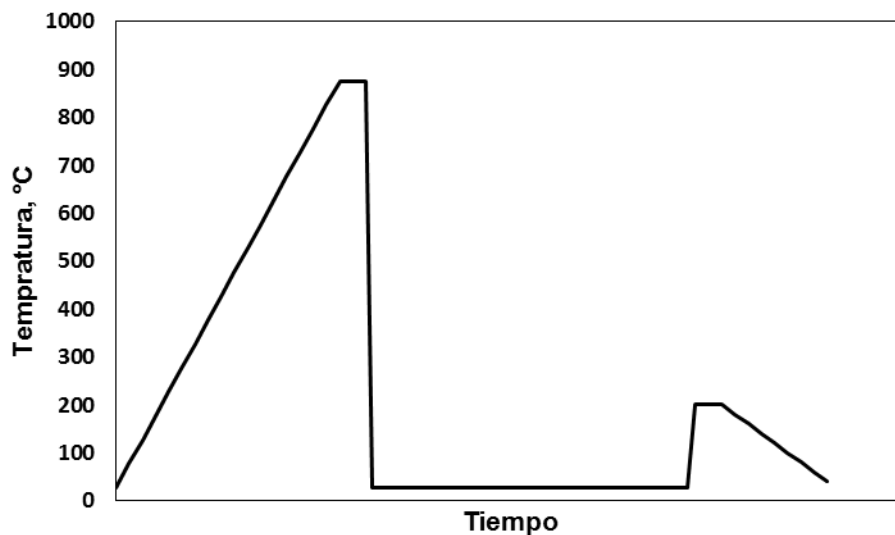


Fig. 2.8. Curva de variación temperatura-tiempo para el post tratamiento térmico de temple y revenido para los discos cementados.

El post tratamiento térmico se realiza en una atmósfera de argón utilizando para este objetivo una cámara de gases inertes con el fin de evitar la oxidación de los especímenes durante el proceso, en la Fig. 2.9 se presenta dicha cámara en funcionamiento durante la realización de uno de los tratamientos.

El proceso para realizar el post tratamiento térmico consiste en el montaje de la cámara de gas inerte dentro de la cámara del horno, a una temperatura inicial de 75 °C. Dicho montaje requiere la colocación de la cámara de gases inertes de forma concéntrica en la cámara del horno para luego sellar la parte frontal del horno con fibra cerámica, a modo de confinar la energía

térmica dentro del horno, evitar caídas de temperatura y propiciar un ambiente seguro de operación. En la Fig. 2.9 se puede observar el montaje descrito.



Fig. 2.9. Cámara de gas inerte durante el post tratamiento térmico de los discos cementados.

Una vez el equipo se encuentra colocado adecuadamente, se procede a introducir los discos dentro de la cámara. Debido a las dimensiones de la cámara, solamente se introducen 6 discos dentro de esta, para facilitar la extracción de los discos para su enfriamiento en aceite, por lo tanto el post tratamiento térmico se hará en 3 grupos, con 6 discos en cada grupo.

Posterior a colocar los discos dentro de la cámara, esta se cierra y se sella usando silicón, esto con el propósito de evitar fugas y propiciar una atmósfera controlada. Posteriormente se realizan incrementos de temperatura de 50 °C cada 10 min, para propiciar de esta manera que la temperatura del interior de la cámara de gas inerte alcance la temperatura seleccionada y se mantenga uniforme. Una vez alcanzada la temperatura de temple, el tiempo de mantenimiento a la temperatura de temple para un espesor 12.67 mm (1/2 pulg) es de 30 min, por lo tanto la relación para un espesor de 10 mm corresponde a

20 min, tiempo al cual se mantienen los especímenes antes de ser retirados de la cámara de gas inerte y ser enfriados inmediatamente en aceite.

Después del enfriamiento de los especímenes, se espera a que el horno enfríe hasta los 100 °C para así colocar una vez más los discos dentro de la cámara del horno y llevarlos a una temperatura de 200 °C la cual corresponde a la temperatura de revenido para un acero AISI 1020 cementado, el tiempo de mantenimiento a esta temperatura es de 20 min y una vez transcurrido dicho tiempo, los discos se dejan enfriar al aire libre.

2.7. TRATAMIENTO TÉRMICO DE LAS ESPIGAS

Las espigas de acero AISI O1 son sometidas a un tratamiento térmico de temple y revenido; en la Fig. 2.10 se observa la curva de Temperatura – tiempo correspondiente al tratamiento térmico de las espigas.

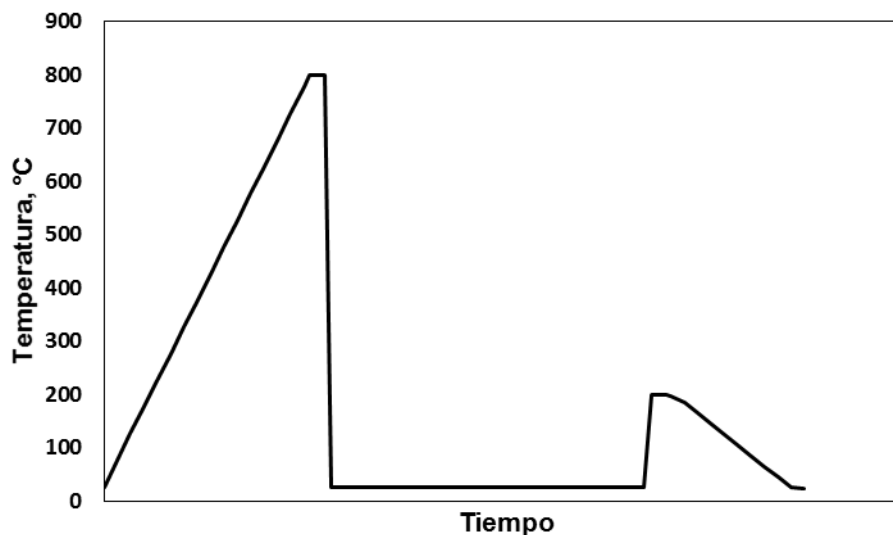


Fig. 2.10. Curva de variación temperatura-tiempo para el tratamiento térmico de temple y revenido de las espigas de acero AISI O1.

El procedimiento para realizar el tratamiento térmico de las espigas consiste en los mismos pasos que se siguieron en el post tratamiento térmico

de los discos, con la única diferencia que en esta ocasión se realiza el tratamiento térmico de las 18 espigas en una sola sesión, para facilitar el proceso de temple se han dispuesto 6 grupos de 3 espigas amarrados a una argolla de alambre. La temperatura de austenización para un acero AISI O1 corresponde a 800 °C y de acuerdo a la relación de tiempos de mantenimiento, para una sección de 20 mm el tiempo correspondiente es de 10 min y por lo tanto para una sección de 4 mm el tiempo de mantenimiento a la temperatura dada es de 2 min. Igual que los discos, el temple se realiza en aceite.

El proceso de revenido se realiza una vez que el horno alcanza una temperatura de 100 °C, momento en el cual se introducen las espigas dentro de la cámara del horno y luego se hace llegar a una temperatura de 200 °C. El tiempo de mantenimiento a dicha temperatura, de acuerdo a la relación, que para una sección de 20 mm requiere 1 hora para este tipo de acero, corresponde a 12 min. Una vez pasados los 12 min las espigas son extraídas de la cámara del horno para un enfriamiento al aire libre. Posterior al tratamiento térmico, los especímenes se envuelven en papel absorbente y se guardan para su uso en el experimento.

2.8. PREPARACIÓN PREVIA AL ENSAYO DE DESGASTE TIPO ESPIGA SOBRE DISCO

Tanto los discos cementados como los no cementados y las espigas son sometidos a un proceso previo a la ejecución del experimento, dicha preparación consiste en una limpieza del espécimen.

Para los discos no cementados, el proceso de limpieza consiste en un lavado con agua y jabón líquido a modo de retirar los residuos del aceite en el que ha estado guardado tras el proceso de maquinado. Los discos cementados fueron guardados tras al post tratamiento térmico por lo que su proceso de limpieza consiste en un cepillado.

Después del proceso de limpieza respectivo a la condición del espécimen se realiza un proceso de lijado manual de las superficies que estarán en contacto durante la realización del ensayo, para los discos sin cementar se escoge una de las dos caras y se realiza el lijado desde una hoja basta de SIC número 100, luego se utilizan hojas menos bastas (210, 300 y 400), hasta llegar a las más finas (500 y 600) En la Fig. 2.11 se muestra la superficie de uno de los discos tras el proceso de lijado. El mismo proceso descrito se realiza con los discos cementados, cabe aclarar que en dichos discos, es la superficie cementada la que se somete al proceso de lijado.



Fig. 2.11. Disco de acero AISI 1020 tras el proceso de lijado.

Un proceso similar se realiza con la sección plana de la espiga que se someterá al ensayo, la diferencia radica en que, para dicha sección se utilizan los números de lija anteriormente mencionada, pero el proceso continúa hasta utilizar hojas más finas (800 y 1000), hasta llegar a la hoja final número 1200.

Luego los especímenes se secan utilizando aire caliente, para asegurar la remoción de la humedad, así dicho proceso se realiza con mayor intensidad en los discos, debido a que el acero AISI 1020 no presenta resistencia a la oxidación, a diferencia del acero AISI O1. Posteriormente, los discos son

envueltos en papel absorbente y se guardan en bolsas plásticas con cierre hermético para protegerlos de la oxidación.

2.9. ENSAYO DE DESGASTE TIPO ESPIGA SOBRE DISCO

Los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco se realizan en un módulo para ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco marca GUNT, modelo TM 260.3, el cual se ocupa como complemento al módulo básico para estudios tribológicos de la misma marca, modelo TM 260, los cuales se encuentra ubicados en el laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica (ver Fig. 2.12).

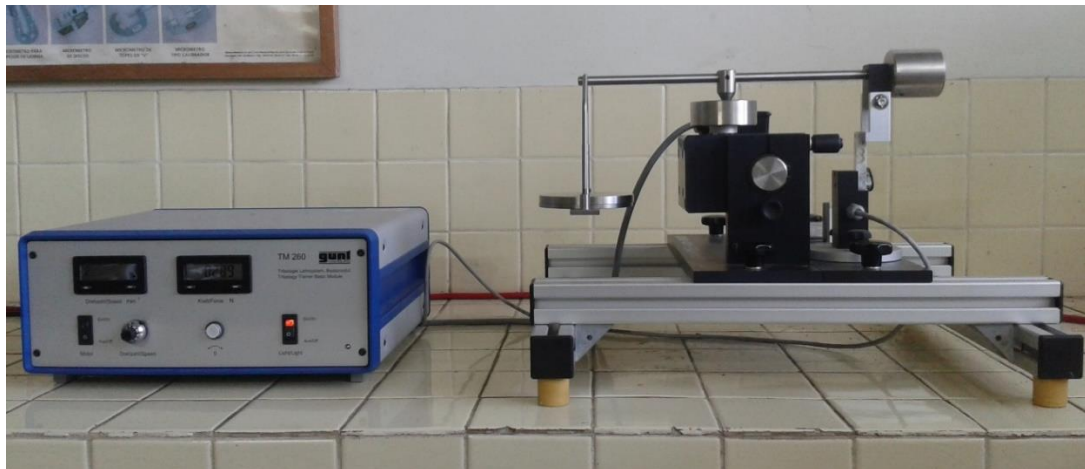


Fig. 2.12. Módulo para ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco marca GUNT, TM 260.3.

El módulo para ensayos tipo espiga sobre disco permite posicionar una espiga con una superficie de contacto (plana o hemisférica) perpendicular a un disco, este último se fija a un vaso mediante un perno, permitiendo así mediante el árbol de accionamiento del módulo que el disco gire produciendo un movimiento de deslizamiento entre las dos superficies en contacto de los especímenes cuya trayectoria es un círculo en la superficie del disco; para el caso de los experimentos a realizar se utilizan espigas de superficie plana. La

espiga se coloca contra el disco y se aplica una carga constante por medio de un brazo al cual se le agregan pesos, en la Fig. 2.13 se presenta un esquema del módulo para ensayos tipo espiga sobre disco en el que se enumeran sus componentes más importantes.

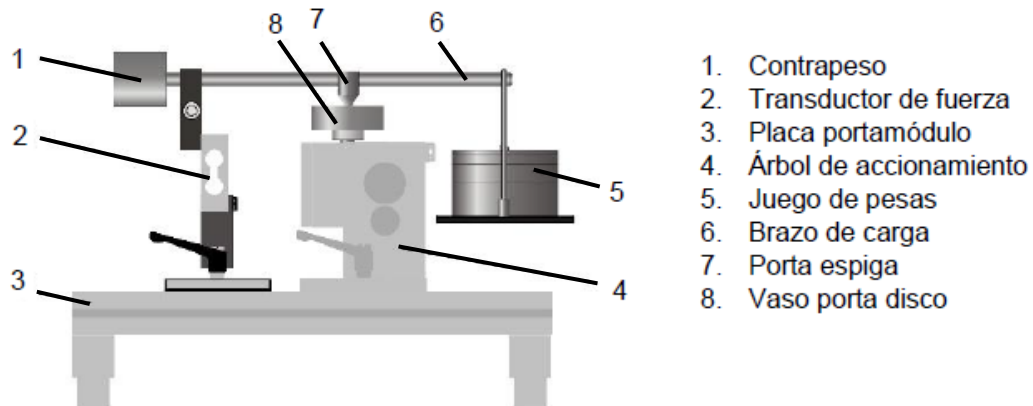


Fig. 2.13. Módulo para ensayos tipo espiga sobre disco con sus principales componentes señalados.

Los resultados de desgaste se reportan separadamente como la pérdida de masa en gramos para la espiga y el disco. La cantidad de desgaste es determinada pesando en una balanza analítica (ver Fig. 2.14) ambos especímenes antes y después de la prueba.

Se hace uso de una balanza ubicada en la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad de El Salvador. Así, por la limitación que presenta estar transportando los especímenes entre las dos facultades, se procede a guardar los discos que ya han sido ensayados en una campana de vacío (ver Fig. 2.15), para protegerlos de la contaminación de diferentes partículas y principalmente para protegerlos de la corrosión ambiental.



Fig. 2.14. Balanza analítica marca Ohaus.



Fig. 2. 15. Campana de vacío.

Los resultados de desgaste normalmente son obtenidos realizando los ensayos para una distancia de deslizamiento, carga y velocidad seleccionada, en la Tabla 2.3 se presentan las diferentes variables del experimento para las condiciones de los discos cementados y no cementados, se realizarán 3 experimentos por cada una de las 12 variantes.

Tabla 2.3. Condiciones y variables bajo las que se realizan los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco.

Condición	Variables		
	Velocidad, m/s	Distancia de deslizamiento, m	Carga, N
Acero AISI 1020 no cementado	0.05	1000	5
			10
			15
		1500	5
			10
			15
Acero AISI 1020 cementado	0.05	1000	5
			10
			15
		1500	5
			10
			15

La velocidad a la que se realizarán todos los experimentos corresponde a 0.05 m/s, la cual es una velocidad recomendada para realizar los ensayos tipo espiga sobre disco (Staia, y otros, 2013), el módulo con que se cuenta para hacer dichos ensayos permite ajustar con el potenciómetro un número de revoluciones de salida entre 0 y 200 rpm, por lo tanto, es necesario convertir la velocidad lineal a velocidad angular para determinar el número de revoluciones con el que se realizarán los experimentos. Para convertir la velocidad lineal a velocidad angular se ocupa la Ec. 2.1.

$$\omega = v/r \quad (2.1)$$

donde: ω es la velocidad angular en rad/s, v es la velocidad lineal en m/s y r es el radio de la trayectoria de deslizamiento en m.

El diámetro de la trayectoria de deslizamiento se obtiene realizando una medición en el disco de prueba que incluye el módulo de ensayos tipo espiga sobre disco, en dicho espécimen se realizaron dos mediciones, la del diámetro interno de la huella y la del diámetro externo, cuyos valores fueron 4.06 y 4.26 cm respectivamente, de ambos valores se obtiene el diámetro central de la huella de desgaste, el cual sería el valor medio correspondiente a 4.16 cm. Por lo tanto sustituyendo en Ec. 2.1 se obtiene un valor de 2.40 rad/s, convirtiéndolo

a revoluciones por minuto se tienen 22.96 rpm, los cuales se aproximan a 23 rpm.

Debido a que el módulo para ensayos tipo espiga sobre disco no puede determinar la distancia de deslizamiento directamente, durante la ejecución de los experimentos se llevará un registro de tiempos, en lugar de distancias. Para obtener el tiempo equivalente a una determinada distancia se procede a dividir la distancia de deslizamiento entre la velocidad lineal así como se indica en la Ec. 2.2.

$$t = s/v \quad (2.2)$$

donde: t es el tiempo en segundos, s la distancia de deslizamiento en metros y v la velocidad lineal de deslizamiento.

Así, debido a que la velocidad de deslizamiento es la misma para todos los experimentos (0.05 m/s) y se trabaja con dos distancias de deslizamiento diferentes, el tiempo requerido tanto para 1000 y 1500 m es de 20000 y 30000 s respectivamente, transformándolos a horas corresponden a 5:33 y 8:20 horas, respectivamente.

Una vez establecidas las variables de tiempo y cargas se procede a realizar los ensayos. Después de encender la caja de mando y el motor de la misma, se colocan tanto el disco como la espiga en sus respectivos soportes y se baja el brazo de carga de manera que la espiga se apoye en el disco, luego se colocan en el portacarga la combinación de pesas correspondiente a la carga bajo la que se realizará el experimento según la Tabla 2.3, posteriormente se coloca éste al brazo de carga. Finalmente se ajusta el número de revoluciones en la caja de mando y se lee el valor de la fuerza de fricción y se anota el valor, se realizan lecturas cada minuto con el objetivo de generar una curva para el coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento, para determinar el coeficiente de fricción se hace uso de la Ec. 2.3.

$$\mu = \frac{f_f}{F} \quad (2.3)$$

donde: μ es el coeficiente de fricción, f_f es la fuerza de fricción medida en N y F es la carga seleccionada para el experimento en N.

2.10. DETERMINACIÓN DE DUREZA

Para la determinación de dureza superficial de las capas cementadas, se utiliza el ensayo de dureza Rockwell C, un método recomendado para la determinación de dureza de materiales endurecidos o templados y revenidos. Para la realización de dicho ensayo se utiliza un durómetro marca RAMS perteneciente a los Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de esta Universidad (ver Fig. 2.16).

La dureza del material se lee directamente del dial indicador de la máquina, puesto que dicha escala está dada por el incremento de profundidad del penetrador. Para determinar la escala C de dureza se aplica una carga total de 150 kg_f y se utiliza un penetrador de diamante y de geometría cónica (ver Fig. 2.17). Así, se realizan 5 tomas de dureza sobre diferentes puntos en la superficie de la muestra.

Para determinar la dureza de una probeta, esta debe poseer una superficie lisa y nivelada, de esta manera se permite tener una superficie paralela a la base del porta muestra y perpendicular a la carga aplicada por el penetrador y por lo tanto es propicia la realización de una medición confiable. Además, la superficie debe de estar libre de óxidos, aceites o cualquier material contaminante.



Fig. 2.16. Durómetro marca RAMS.

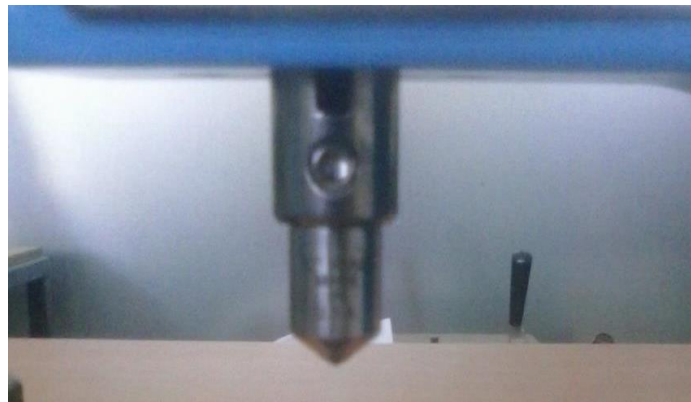


Fig. 2.17. Penetrador de diamante de geometría cónica utilizado para la escala de dureza Rockwell C.

Para determinar la dureza de la muestra se procede a colocarla directamente sobre el portamuestra del durómetro y luego se gira el disco del tornillo de aplicación de carga hasta que la superficie de la probeta haga contacto con el indentador, tal como se presenta en la Fig. 2.18, posteriormente se continúa girando el tornillo hasta que el dial indique una lectura de 0.



Fig. 2.18. Posicionamiento de la probeta durante la medición de dureza.

Posteriormente se aplica una precarga de 10 kg_f girando el disco del tornillo a una velocidad moderada y constante con el fin de completar 2 vueltas hasta ajustar nuevamente a 0. Después se levanta la palanca de aplicación de carga adicional y se aplica una carga de 140 kg_f (Obteniendo así una carga total de 150 kg_f), la palanca se debe mantener en posición vertical durante 4 s y finalmente se retira la carga adicional y se lee el valor de dureza en el dial indicador del durómetro.

2.11. MEDICIÓN DEL ESPESOR DE LA CAPA CEMENTADA

Para medir del espesor de la capa cementada se hará uso de un microscopio de retícula graduada, por lo tanto, es necesario preparar una muestra metalográfica de uno de los especímenes cementados. En primera instancia se realiza un corte a uno de los especímenes ensayados tal como se presenta en el detalle A de la Fig. 2.19.

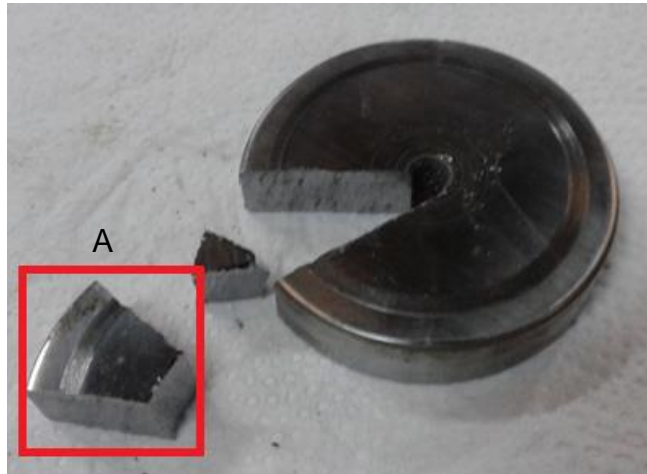


Fig. 2.19. Corte de la muestra metalográfica a preparar para la medición del espesor de la capa cementada. A es un detalle de la muestra.

Posteriormente se realiza el embutido de la muestra extraída mediante corte, para realizar dicho proceso se utiliza resina poliéster, el proceso se ejecuta en frío y se espera entre 6 y 12 horas para que la resina se seque.

Tras el embutido de la muestra se procede a realizar un pulido de la superficie a observar, primeramente se realiza un desbaste mecánico utilizando lijas de agua de los números 100, 200, 320, 400, 500 y 600. Posteriormente se realiza un pulido grueso utilizan lijas número 1000, 1200 y 1500. Para realizar el pulido final (pulido de espejo) se utiliza la máquina pulidora (ver Fig. 2.20), para dicha operación se deposita alúmina (Al_2O_3) sobre un paño afelpado montado sobre un plato giratorio en la máquina.

Una vez pulida la superficie se procede a atacar químicamente la misma para poder revelar sus fases presentes. El reactivo utilizado para el ataque químico es nital al 2% de concentración que es un compuesto de ácido nítrico (2%) diluido en alcohol que compone el 98% restante.



Fig. 2.20. Pulidora marca Presi.

Posteriormente se utiliza un microscopio óptico de retícula graduada (ver Fig. 2.21) para poder observar la muestra a un aumento de 100x y medir directamente el espesor de la capa cementada.



Fig. 2.21. Microscopio óptico.

Las imágenes se capturarán con un equipo Mimio View y una computadora en conjunto con el microscopio, en la Fig. 2.22 se presentan los 3 equipos acoplados durante la toma de fotografías.

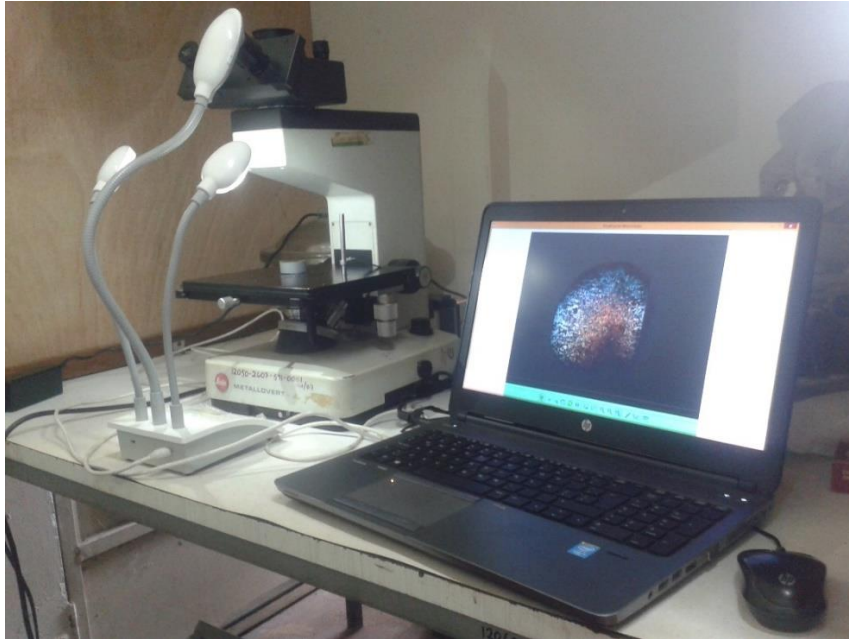


Fig. 2.22. Equipo utilizado para la medición del espesor de la capa cementada.

En este capítulo se ha presentado el diseño experimental de la investigación, describiendo cada uno de los procesos que se siguieron para obtener los datos concernientes al estudio, los cuales en el siguiente capítulo serán tratados y discutidos para poder llegar a conclusiones y resultados, cumpliendo así los objetivos de la investigación.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos mediante la ejecución de las técnicas experimentales descritas en el capítulo 2, su ordenamiento y posterior análisis.

La presentación de los resultados se realiza mediante tablas y figuras tanto para el valor de dureza y el espesor de la capa cementada, como también para los ensayos tipo espiga sobre disco correspondientes a las diferentes condiciones de los discos a ensayar y a las diferentes combinaciones de parámetros de los ensayos, realizando un análisis estadístico de los datos y comparándolos entre sí.

3.1. DETERMINACIÓN DE DUREZA ROCKWELL C

Para la determinación de la dureza de los especímenes cementados se tomaron 5 mediciones distintas en la superficie de una misma muestra, en la Tabla 3.1 se presentan los resultados de dichas mediciones.

Tabla 3.1. Medición de dureza Rockwell C.

N°	Dureza, HRC	HRC Promedio	DE de HRC
1	53	47.82	3.88
2	51		
3	45		
4	45		
5	45.1		

El valor promedio de dureza de la capa cementada es 47.82 HRC, con una desviación estándar de 3.88 HRC.

3.2. MEDICIÓN DEL ESPESOR DE LA CAPA CEMENTADA

Utilizando un microscopio óptico marca **Leitz** modelo **Metallovert**, con un ocular graduado y una regla con escala microscópica se pudo escalar para medir directamente el espesor de la capa cementada y con el conjunto de microscopio óptico, cámara Mimio View y una computadora se capturaron las imágenes. Así, en la Fig. 3.1 se presenta una secuencia de fotografías de la capa cementada donde se puede apreciar la variación de la concentración de perlita desde la superficie rica en ésta, hasta el núcleo del metal base y en la Fig. 3.2 se presenta la medición directa de la profundidad de la capa cementada.

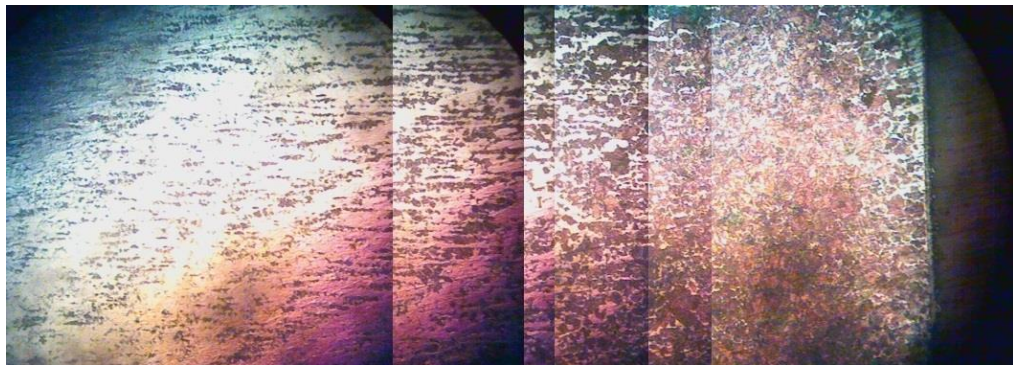


Fig. 3.1. Secuencia fotográfica de la capa cementada.



Fig. 3.2. Medición del espesor de la capa cementada.

En las Fig. 3.1 y 3.2 se presentan una capa superficial del acero AISI 1020. Así se observa en la superficie una microestructura completamente perlítica la cual disminuye hacia el interior del material hasta llegar a la zona característica para el acero AISI 1020. Además, se puede observar que el espesor de la capa cementada es de 1.15 mm

3.3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DESGASTE

A continuación se presentan los resultados obtenidos tras la realización de los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco, dichos resultados comprenden las cantidades de desgaste tanto de los discos de acero AISI 1020 sin y con cementación, el desgaste de las espigas de acero AISI O1 y las curvas del coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento.

En el capítulo 2 se especificó el uso de una balanza analítica para poder determinar el peso de los especímenes antes y después de cada ensayo. Para cada espécimen se realizaron 3 mediciones diferentes de peso inicial y final. En la Tabla 3.2 se presentan los valores promedio para el peso de cada disco, especificando los parámetros bajo los que se realizó el ensayo; de la misma manera, en la Tabla 3.3 se presentan los datos correspondientes a la espiga de acero AISI O1.

En la Tabla 2.3 se presentaron las variables y condiciones bajo las que se realizaron los ensayos de desgaste, para cada condición se realizaron 3 experimentos y de la Fig. 3.3 a la Fig. 3.14 se presentan las gráficas de la variación del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento correspondientes a cada condición. Dichos resultados fueron obtenidos mediante la toma del valor de la fuerza de fricción durante la realización de cada experimento y posteriormente serán procesados utilizando la Ec. 2.3.

Tabla 3.2. Valores de desgaste para los discos cementados y no cementados.

N°	Parámetros de ensayo	Media peso inicial, g	Media peso final, g	Diferencia de pesos
1	MB, 1000 m, 5 N	153.2500	153.2499	0.0001
2		153.3600	153.3598	0.0002
3		154.0294	154.0291	0.0003
4	MB, 1000 m, 10 N	152.0400	152.0361	0.0039
5		155.1530	155.1486	0.0044
6		153.3976	153.3924	0.0052
7	MB, 1000 m, 15 N	153.2600	153.2527	0.0073
8		154.1346	154.1268	0.0077
9		152.9810	152.9747	0.0063
10	MB, 1500 m, 5 N	153.9504	153.9484	0.0019
11		154.3509	154.3488	0.0021
12		153.2276	153.2253	0.0023
13	MB, 1500 m, 10 N	153.7296	153.7237	0.0058
14		154.2850	154.2787	0.0063
15		154.2000	154.1932	0.0068
16	MB, 1500 m, 15 N	152.1027	152.0906	0.0121
17		154.0707	154.0598	0.0109
18		154.1376	154.1272	0.0104
19	C, 1000 m, 5 N	155.0452	155.0453	0.0000
20		151.8448	151.8439	0.0009
21		153.0073	153.0070	0.0003
22	C, 1000 m, 10 N	154.3300	154.3268	0.0032
23		153.6126	153.6090	0.0036
24		154.2086	154.2046	0.0040
25	C, 1000 m, 15 N	153.4900	153.4853	0.0047
26		152.7978	152.7930	0.0048
27		154.0499	154.0451	0.0048
28	C, 1500 m, 5 N	151.9524	151.9508	0.0016
29		153.2102	153.2090	0.0012
30		152.4233	152.4220	0.0013
31	C, 1500 m, 10 N	154.2374	154.2332	0.0042
32		151.9728	151.9687	0.0041
33		152.3305	152.3263	0.0042
34	C, 1500 m, 15 N	153.2897	153.2812	0.0085
35		153.1508	153.1433	0.0075
36		154.6486	154.6400	0.0086

Tabla 3.3. Valores de desgaste para la espiga.

N°	Parámetros de ensayo	Media peso inicial, g	Media peso final, g	Diferencia de pesos
1	MB, 1000 m, 5 N	2.3700	2.3700	0.0000
2		2.3700	2.3700	0.0000
3		2.3722	2.3721	0.0001
4	MB, 1000 m, 10 N	2.3700	2.3700	0.0000
5		2.3716	2.3714	0.0002
6		2.3702	2.3701	0.0001
7	MB, 1000 m, 15 N	2.3700	2.3700	0.0000
8		2.3720	2.3716	0.0004
9		2.3498	2.3490	0.0008
10	MB, 1500 m, 5 N	2.3722	2.3722	0.0000
11		2.3690	2.3687	0.0003
12		2.3639	2.3636	0.0002
13	MB, 1500 m, 10 N	2.3721	2.3720	0.0001
14		2.3714	2.3714	0.0000
15		2.3547	2.3545	0.0002
16	MB, 1500 m, 15 N	2.3714	2.3702	0.0012
17		2.3561	2.3547	0.0014
18		2.3545	2.3531	0.0014
19	C, 1000 m, 5 N	2.3701	2.3695	0.0006
20		2.3570	2.3565	0.0005
21		2.3531	2.3528	0.0002
22	C, 1000 m, 10 N	2.3700	2.3700	0.0000
23		2.3565	2.3561	0.0004
24		2.3501	2.3498	0.0003
25	C, 1000 m, 15 N	2.3700	2.3700	0.0000
26		2.3522	2.3517	0.0004
27		2.3490	2.3486	0.0004
28	C, 1500 m, 5 N	2.3695	2.3690	0.0005
29		2.3636	2.3631	0.0005
30		2.3528	2.3522	0.0007
31	C, 1500 m, 10 N	2.3687	2.3665	0.0022
32		2.3631	2.3615	0.0016
33		2.3517	2.3501	0.0016
34	C, 1500 m, 15 N	2.3665	2.3639	0.0026
35		2.3615	2.3603	0.0012
36		2.3603	2.3570	0.0033

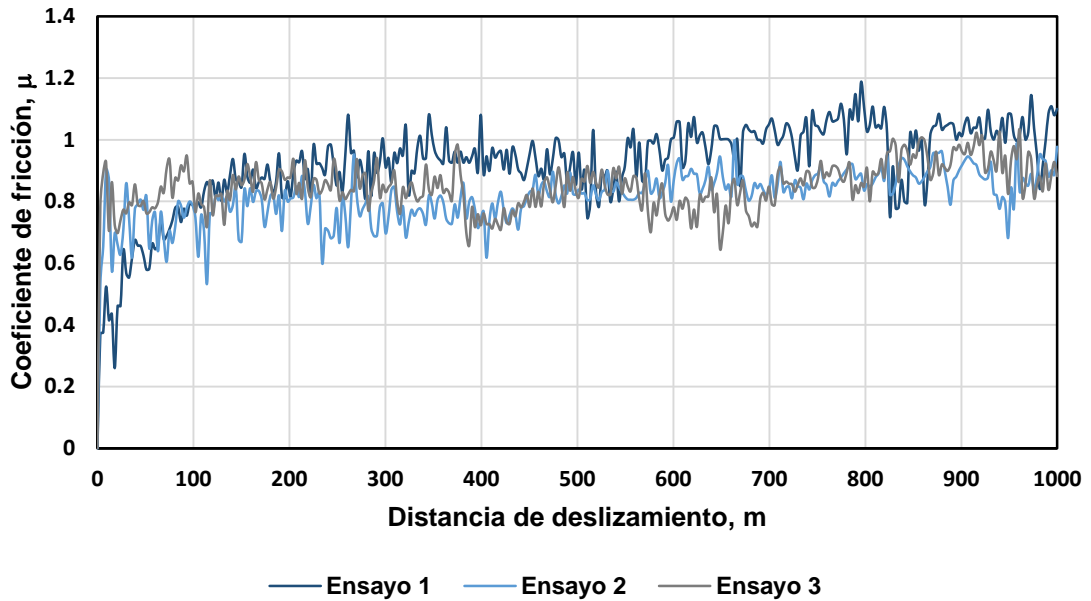


Fig. 3.3. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero AISI 1020 sin cementar y una espiga de acero AISI O1, con carga de 5 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.

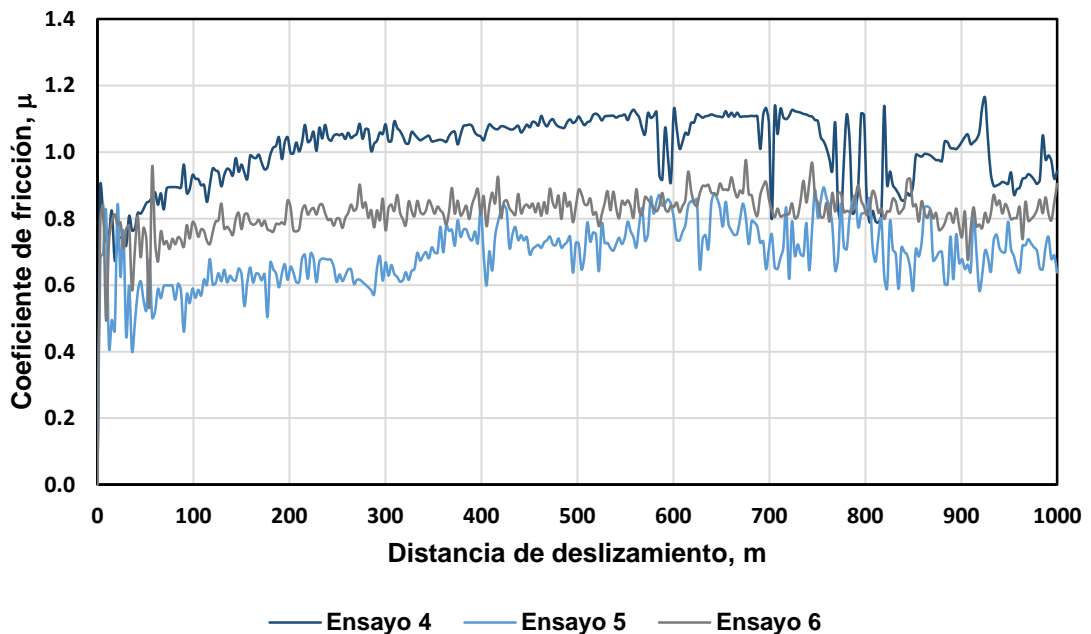


Fig. 3.4. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero AISI 1020 sin cementar y una espiga de acero AISI O1, con carga de 10 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.

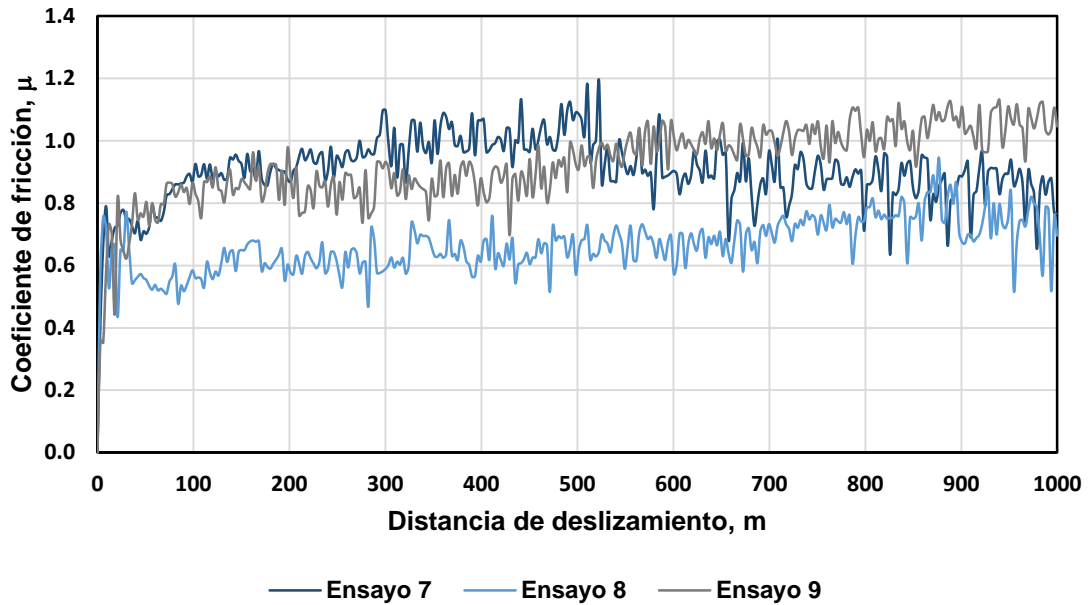


Fig. 3.5. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero AISI 1020 sin cementar y una espiga de acero AISI O1, con carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.

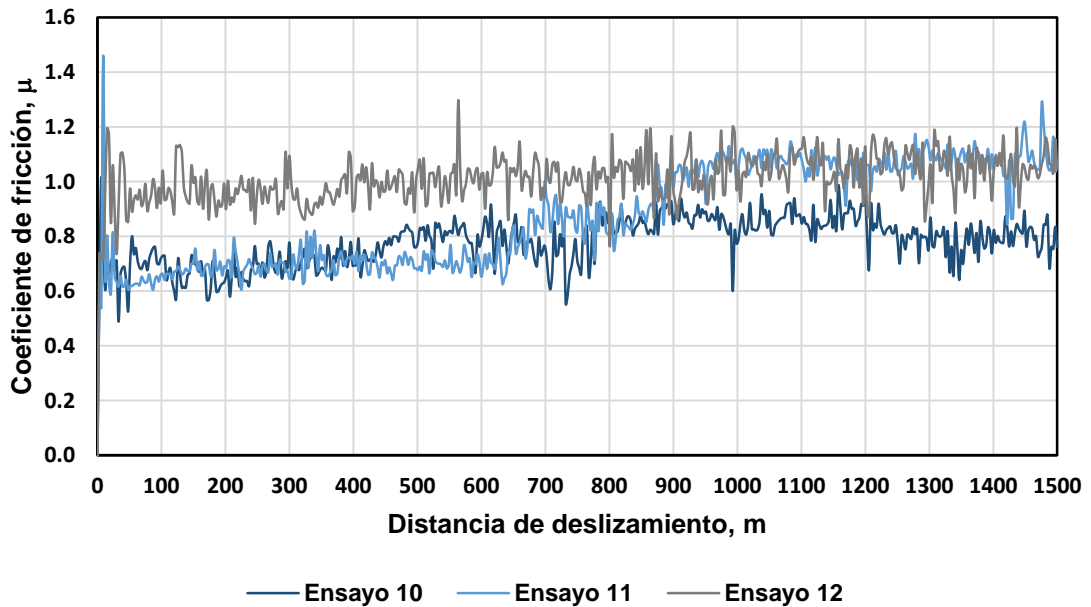


Fig. 3.6. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero AISI 1020 sin cementar y una espiga de acero AISI O1, con carga de 5 N y distancia de deslizamiento de 1500 m.

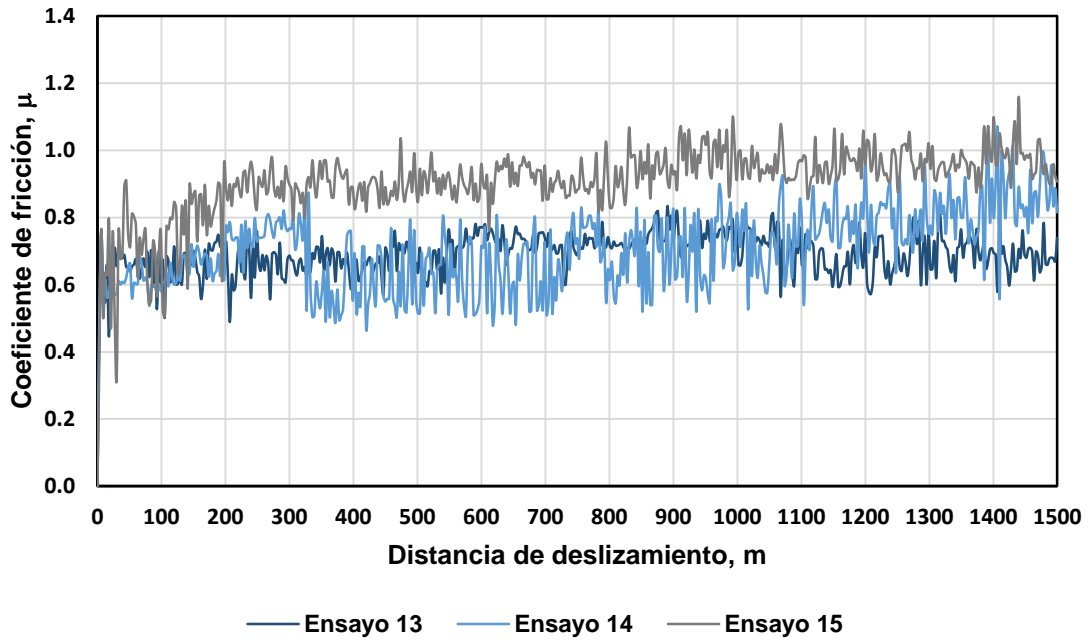


Fig. 3.7. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero AISI 1020 sin cementar y una espiga de acero AISI O1, con carga de 10 N y distancia de deslizamiento de 1500 m.

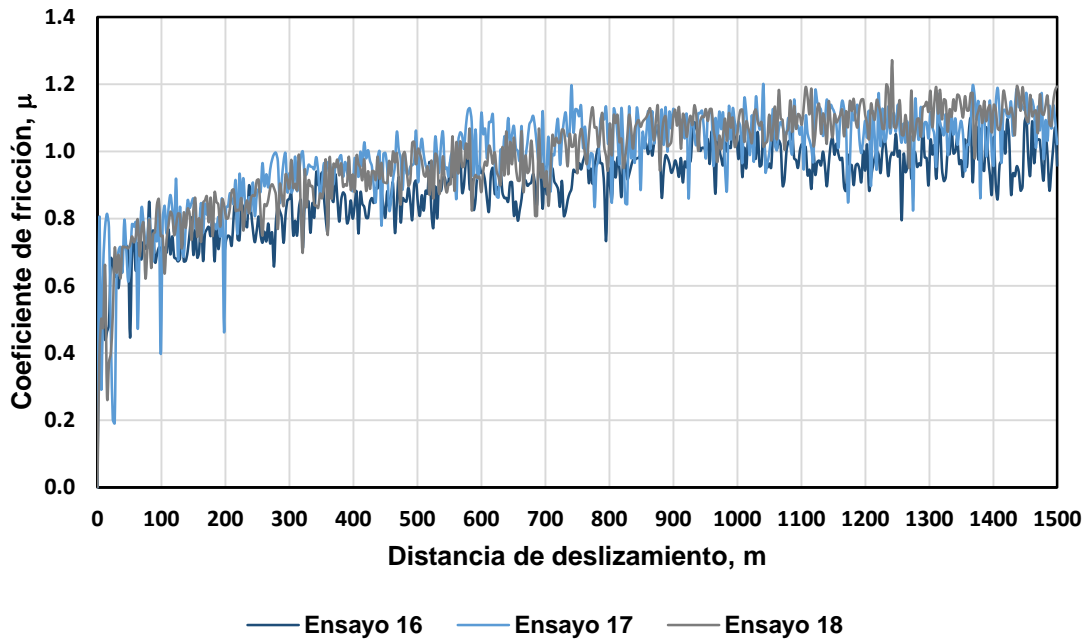


Fig. 3.8. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero AISI 1020 sin cementar y una espiga de acero AISI O1, con carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 1500 m.

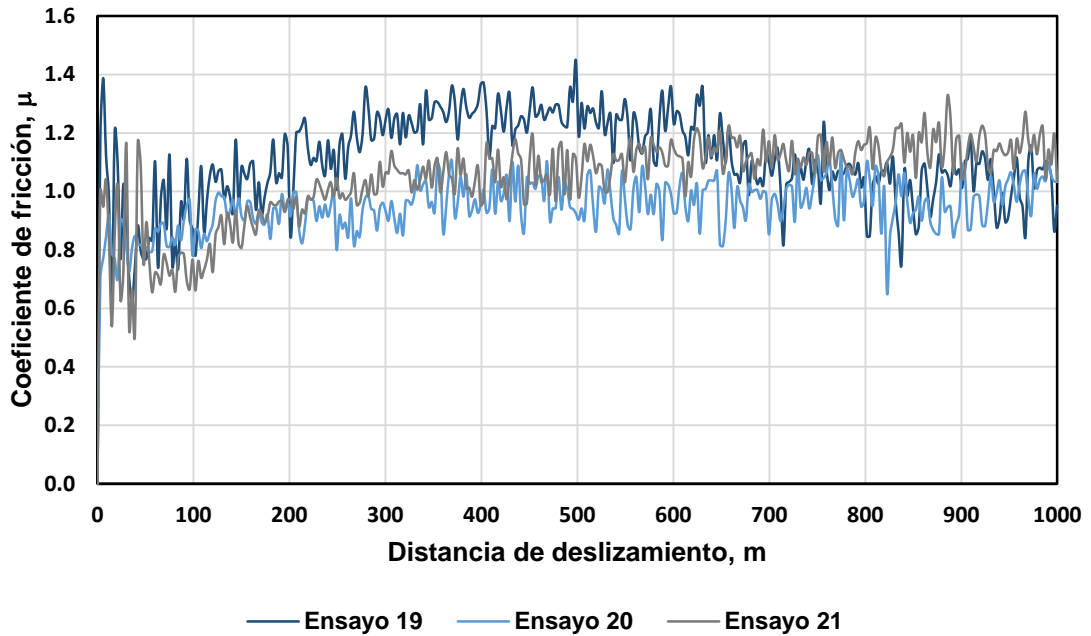


Fig. 3.9. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero AISI 1020 cementados y una espiga de acero AISI O1, con carga de 5 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.

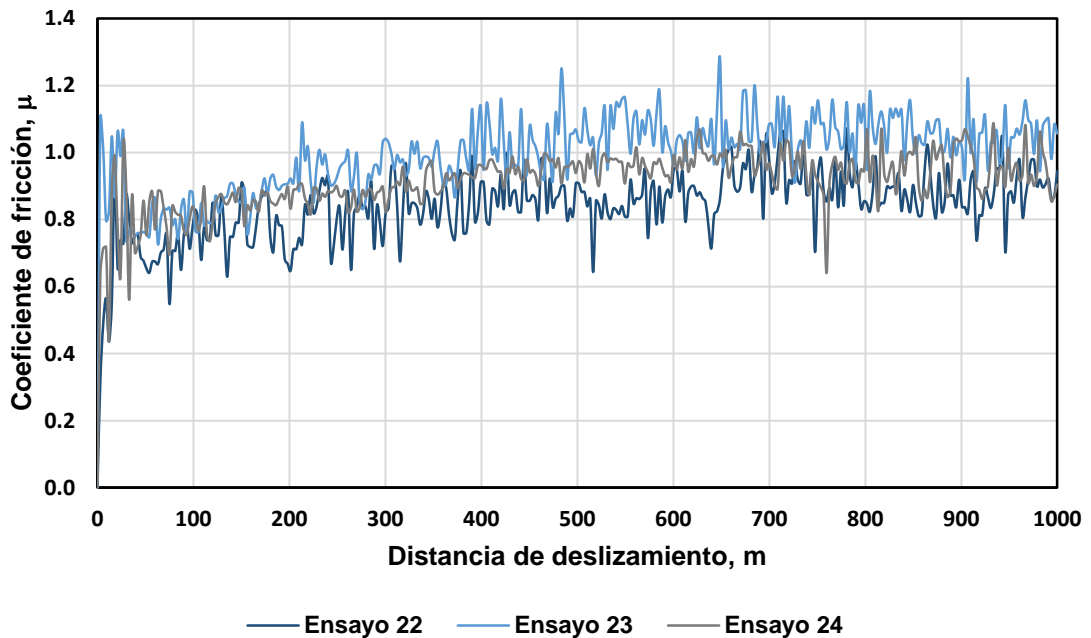


Fig. 3.10. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero AISI 1020 cementados y una espiga de acero AISI O1, con carga de 10 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.

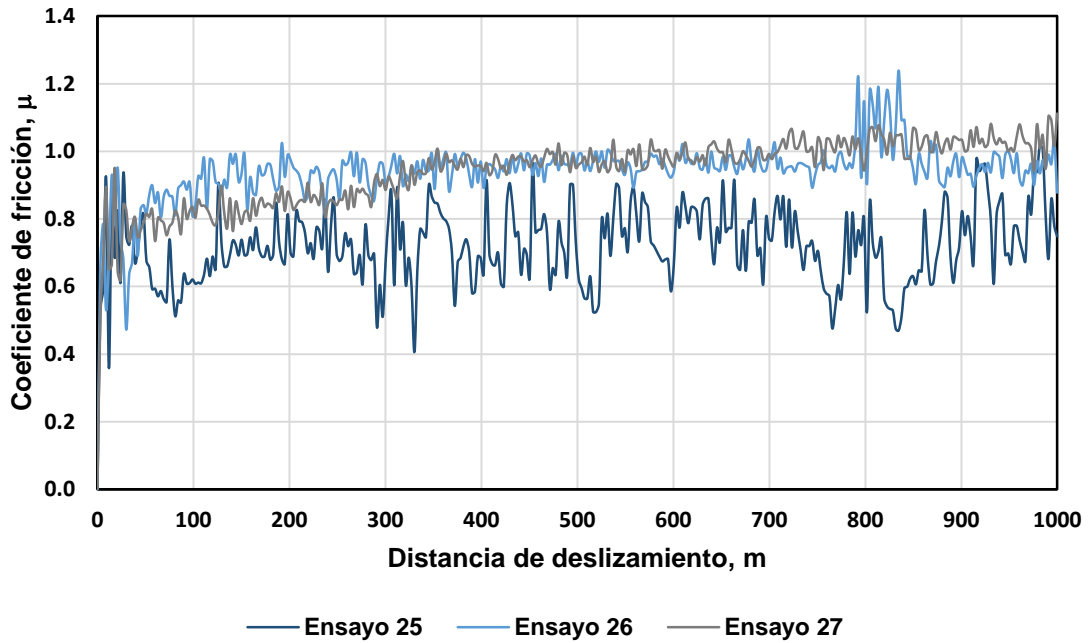


Fig. 3.11. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero AISI 1020 cementados y una espiga de acero AISI O1, con carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.

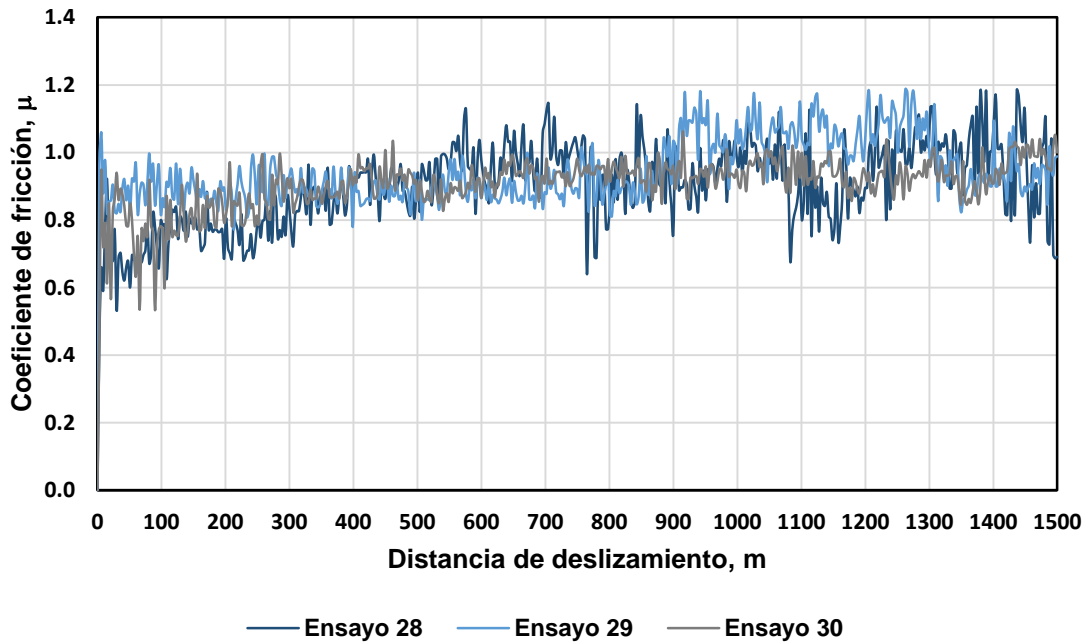


Fig. 3.12. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero AISI 1020 cementados y una espiga de acero AISI O1, con carga de 5 N y distancia de deslizamiento de 1500 m.

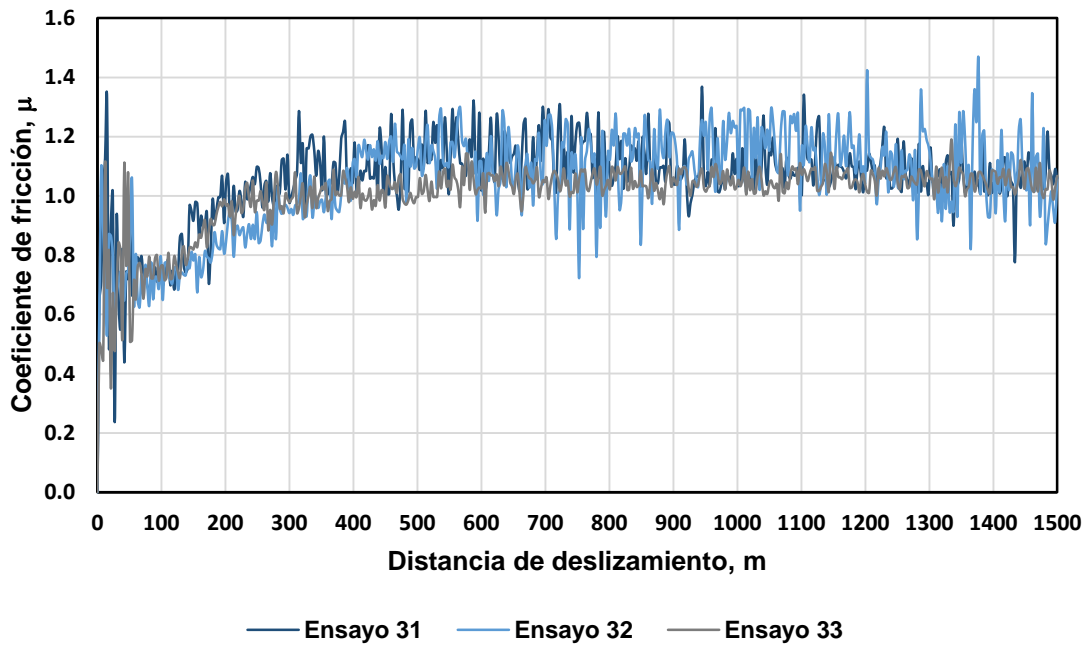


Fig. 3.13. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero AISI 1020 cementados y una espiga de acero AISI O1, con carga de 10 N y distancia de deslizamiento de 1500 m.

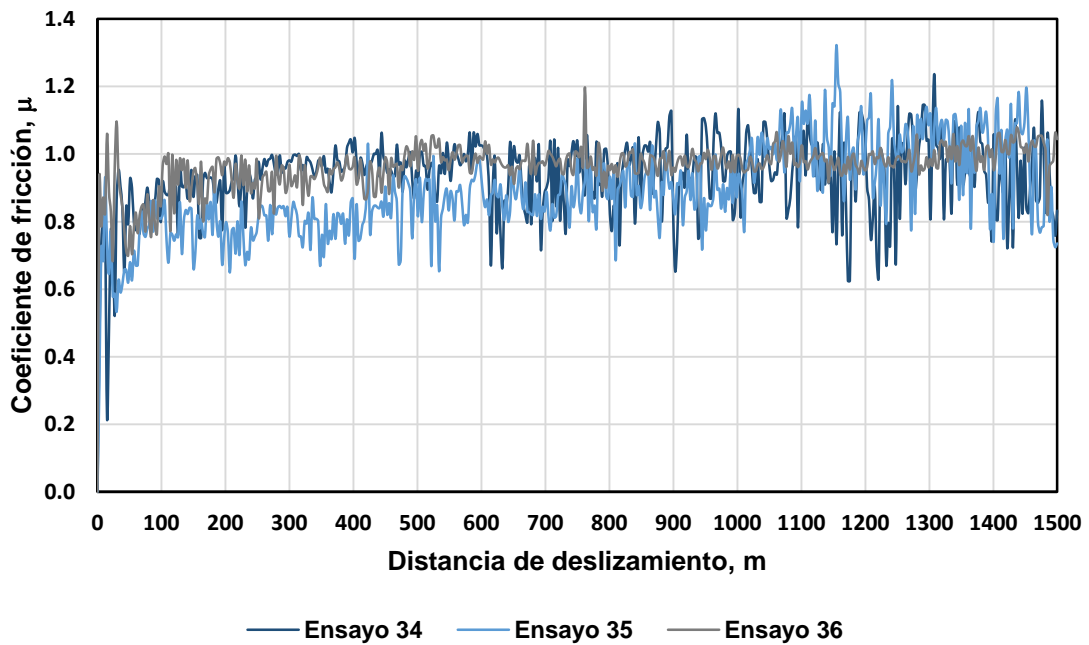


Fig. 3.14. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento para los ensayos de discos de acero AISI 1020 cementados y una espiga de acero AISI O1, con carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 1500 m.

3.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tras presentar los resultados obtenidos mediante los ensayos de desgaste y de las mediciones de dureza de la capa cementada y de la profundidad de la misma se realiza el siguiente análisis.

Con relación a la dureza de la capa cementada, se obtuvo un valor de 47.82 HRC con una desviación estándar de 3.88 HRC y la profundidad de la capa cementada es de 1 mm, esto corresponde a los resultados obtenidos en un trabajo de graduación previo (Artiga, Hernández, & Mezquita, 2002), el cual se tomó como referencia para la realización del tratamiento termoquímico de cementación.

Para el tratamiento de los datos obtenidos tras los ensayos de desgaste se hace uso de la estadística descriptiva. Se ordenarán y presentarán los datos de tal manera que se puedan evidenciar las características de las diferentes condiciones de los ensayos.

3.4.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DESGASTE

En las Tablas 3.4 y 3.5 se presentan el análisis estadístico de los valores de desgaste (diferencia de peso) tanto para los discos como para la espiga.

De dichas tablas se evidencia que tanto al incrementar la carga como la distancia de deslizamiento entre las superficies del disco y de la espiga se produce un aumento de la cantidad de desgaste

Es evidenciable la diferencia del desgaste entre los discos de acero AISI 1020 sin y con cementación con respecto al incremento de la carga, no así para la espiga de acero O1 que presenta una pérdida de masa casi despreciable para las condiciones de carga de 5 y 10 N.

Tabla 3.4. Análisis estadístico del desgaste de los discos medido por su diferencia de peso.

Análisis estadístico del desgaste de los discos por diferencia de peso							
Parámetros de ensayo	Media	Varianza $\times 10^{-7}$	DE $\times 10^{-5}$	Coef. de variación	Error Estándar $\times 10^{-4}$	Mínimo	Máximo
MB, 1000 m, 5 N	0.0002	0.07	8.38	0.37	0.48	0.0001	0.0003
MB, 1000 m, 10 N	0.0045	4.24	65.17	0.14	3.76	0.0039	0.0052
MB, 1000 m, 15 N	0.0071	5.34	73.10	0.10	4.22	0.0063	0.0077
MB, 1500 m, 5 N	0.0021	0.28	16.77	0.08	0.96	0.0019	0.0023
MB, 1500 m, 10 N	0.0063	2.18	46.70	0.07	2.69	0.0058	0.0068
MB, 1500 m, 15 N	0.0112	7.31	85.52	0.07	4.93	0.0104	0.0121
C, 1000 m, 5 N	0.0004	2.23	47.29	1.21	2.73	0.0000	0.0009
C, 1000 m, 10 N	0.0036	1.61	40.18	0.11	2.32	0.0032	0.0040
C, 1000 m, 15 N	0.0048	0.02	5.09	0.01	2.93	0.0047	0.0048
C, 1500 m, 5 N	0.0013	3.81	19.53	0.14	1.12	0.0012	0.0016
C, 1500 m, 10 N	0.0042	0.01	3.33	0.00	0.19	0.0041	0.0042
C, 1500 m, 15 N	0.0082	3.60	60.03	0.07	3.46	0.0075	0.0086

La tabla 3.5 deja en evidencia la pérdida de masa mínima que se da en las espigas de acero O1, tomando en cuenta que dichas espigas fueron templadas y revenidas, es de esperar dicho tipo de resultado, además, se puede identificar que sólo para las condiciones de la mayor carga y la mayor distancia de deslizamiento (15 N y 1500 m) se obtuvo una pérdida de masa considerable de la espiga. Además, para el caso en el que la espiga estuvo en contacto con un disco cementado se registró una mayor pérdida de masa de la espiga, resultado que era de esperarse considerando el endurecimiento debido al tratamiento termoquímico de cementación que presentaban los discos de acero AISI 1020.

Tabla 3.5. Análisis estadístico del desgaste de la espiga medido por su diferencia de peso.

Análisis estadístico del desgaste de la espiga por diferencia de peso							
Parámetros de ensayo	Media	Varianza X10 ⁻⁷	DE X10 ⁻⁵	Coef. de variación	Error Estándar x10 ⁻⁵	Mínimo	Máximo
MB, 1000 m, 5 N	0.0000	0.01	3.84	1.732050808	2.22	0.0000	0.0001
MB, 1000 m, 10 N	0.0001	0.07	8.38	0.943729304	4.84	0.0000	0.0002
MB, 1000 m, 15 N	0.0004	1.47	38.44	0.961046883	22.19	0.0000	0.0008
MB, 1500 m, 5 N	0.0002	0.35	18.95	1.066170132	10.94	0.0000	0.0003
MB, 1500 m, 10 N	0.0001	0.13	11.70	0.957786705	6.75	0.0000	0.0002
MB, 1500 m, 15 N	0.0013	0.09	9.62	0.071572347	5.55	0.0012	0.0014
C, 1000 m, 5 N	0.0004	0.33	18.35	0.413067791	10.59	0.0002	0.0006
C, 1000 m, 10 N	0.0002	0.45	21.43	0.876695524	12.37	0.0000	0.0004
C, 1000 m, 15 N	0.0003	0.62	25.01	0.866025404	14.44	0.0000	0.0004
C, 1500 m, 5 N	0.0006	0.10	10.18	0.183303028	5.87	0.0005	0.0007
C, 1500 m, 10 N	0.0018	1.13	33.72	0.186183937	19.46	0.0016	0.0022
C, 1500 m, 15 N	0.0024	11.91	10.91	0.461146635	63.01	0.0012	0.0033

Con base a los resultados obtenidos de la Tabla 3.4 se presenta en la Fig. 3.15 la curva de desgaste en función de la distancia de deslizamiento para las 6 diferentes combinaciones de carga y condición de materiales ensayados.

En la sección 1.1.6 y por medio de la Fig. 1.10 se expuso que una vez superada la etapa de acoplamiento del desgaste durante los momentos iniciales del proceso, se cumple una relación lineal y que por lo tanto el desgaste es directamente proporcional a la distancia recorrida, la constante de proporcionalidad de dicha relación depende de la carga y demás condiciones del ensayo, por lo tanto, se puede determinar el valor de dicha constante para cada combinación de variables del ensayo.

En la Fig. 3.15 se presentan las curvas de desgaste respecto a la distancia de deslizamiento para los especímenes cementados y no cementados

y las 3 condiciones de cargas respectivas y en la Tabla 3.6 se presentan las constantes de proporcionalidad para cada condición.

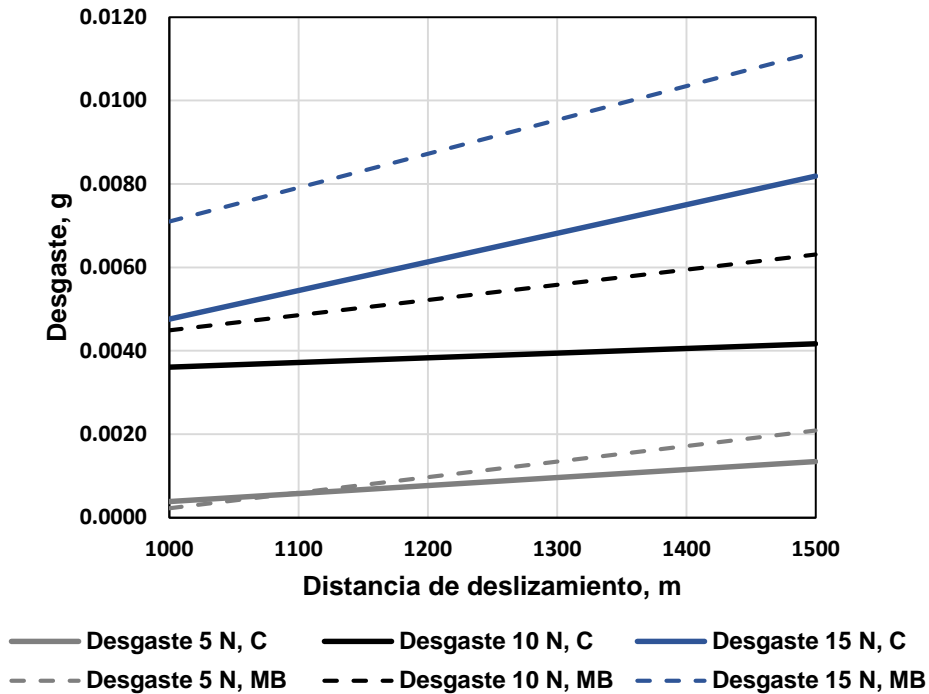


Fig. 3.15. Curvas de desgaste respecto a la distancia de deslizamiento.

Tabla 3.6. Constante de proporcionalidad para cada condición de carga, tanto para los discos cementados como no cementados.

Distancia de deslizamiento, mm	Desgaste, g					
	5 N, C	10 N, C	15 N, C	5 N, MB	10 N, MB	15 N, MB
1000	0.0004	0.0036	0.0048	0.0002	0.0045	0.0071
1500	0.0013	0.0042	0.0082	0.0021	0.0063	0.0112
Constante	1.91E-06	1.11E-06	6.87E-06	3.73E-06	3.64E-06	8.11E-06

Por medio de las curvas de la Fig. 3.3 y los resultados presentados en la Tabla 3.5 se puede identificar que el coeficiente de desgaste se reduce casi a la mitad en los especímenes cementados sometidos a las cargas de 5 y 10 N, sin embargo ese decremento es menos apreciable para los especímenes sometidos a una carga de 15 N, del mismo modo ante esta última condición de carga, se puede apreciar un incremento considerable en la constante de

desgaste tanto para los especímenes cementados como también para los de metal base.

3.4.2. ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN

Basándose en las curvas presentadas anteriormente en las Fig. 3.3 a 3.14, se puede observar que existe una tendencia al incremento del coeficiente de fricción entre los primeros 100 y 200 m de deslizamiento, posteriormente, en algunos casos, el coeficiente de fricción presentó pequeños incrementos hasta los 300 m, pero generalmente se mantuvo fluctuante entre los valores obtenidos durante el primer intervalo. En la Tabla 3.7 se presentan los valores promedio de coeficiente de fricción obtenidos para cada combinación de variables del ensayo.

Con respecto a los resultados de la Tabla 3.6 se puede apreciar que el coeficiente de fricción entre un acero AISI 1020 cementado y una espiga de acero AISI O1 resulta ser ligeramente mayor al correspondiente entre el mismo par de materiales pero para el caso del AISI 1020 no cementada, así mismo, se puede identificar que el valor promedio del coeficiente de fricción entre este par de materiales para la primera condición es de 0.95, mientras que para la segunda condición, el valor promedio del coeficiente de fricción es de 0.86.

Con base en los resultados obtenidos mediante los ensayos y el tratamiento de la información, se puede concluir que la caracterización del desgaste para el presente par de materiales dependerá de las condiciones específicas de operación, pero el mejoramiento del comportamiento al desgaste de un acero AISI 1020 cementado es claramente percibido.

Tabla 3.7. Valores promedio del coeficiente de fricción entre discos de acero AISI 1020 cementados y un pin de acero AISI O1.

N°	Variables de ensayo	Promedio de coeficiente de fricción (por ensayo)	Promedio del coeficiente de fricción	Desviación estándar
1	MB, 1000 m, 5 N	0.9213	0.8610	0.0543
2		0.8159		
3		0.8458		
4	MB, 1000 m, 10 N	1.0049	0.8392	0.1560
5		0.6953		
6		0.8173		
7	MB, 1000 m, 15 N	0.9041	0.8296	0.1477
8		0.6595		
9		0.9251		
10	MB, 1500 m, 5 N	0.7768	0.8862	0.1173
11		0.8718		
12		1.0100		
13	MB, 1500 m, 10 N	0.6900	0.7666	0.1210
14		0.7037		
15		0.9062		
16	MB, 1500 m, 15 N	0.8944	0.9529	0.0507
17		0.9825		
18		0.9818		
19	C, 1000 m, 5 N	1.1088	1.0333	0.1042
20		0.9491		
21		1.0420		
22	C, 1000 m, 10 N	0.8392	0.9151	0.0770
23		0.9931		
24		0.9129		
25	C, 1000 m, 15 N	0.7186	0.8666	0.1282
26		0.9412		
27		0.9400		
28	C, 1500 m, 5 N	0.8998	0.9166	0.0240
29		0.9441		
30		0.9058		
31	C, 1500 m, 10 N	1.0555	1.0354	0.0298
32		1.0496		
33		1.0012		
34	C, 1500 m, 15 N	0.9321	0.9275	0.0365
35		0.8890		
36		0.9615		

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos realizados y del análisis de los mismos de este trabajo de graduación se puede concluir que:

- ✓ La ejecución del tratamiento termoquímico de cementación y el post tratamiento térmico aplicado de temple y revenido, fue exitoso ya que se pudo obtener la dureza y espesor de la capa cementada esperados, tal como se obtuvieron en un trabajo de graduación anterior.
- ✓ Se obtuvo una disminución significativa en la pérdida de peso o desgaste tipo espiga sobre disco en un acero AISI 1020 cementado en comparación con los resultados para el mismo metal base y utilizando una espiga de acero AISI O1, evidenciados por las constantes de desgaste de la tabla 3.6 aplicando las mismas cargas durante las mismas distancias recorridas, lo cual es debido al aumento significativo en la dureza del material cementado en comparación con la del metal base, así en el mismo sentido a partir de estos resultados de desgaste se puede incrementar la vida útil o los plazos de mantenimiento de las piezas cementadas.
- ✓ La pérdida de masa del acero AISI O1 es mínima en comparación a la pérdida de masa tanto para el metal base de acero AISI 1020 sin como también para la condición de metal base de acero AISI 1020 con tratamiento termoquímico de cementación, lo cual es debido a la alta dureza que presenta el primero.
- ✓ Cuando se aplicó la menor carga de 5 N para ambos casos de condición superficial de los discos cementados y no cementados, el valor de la constante de desgaste es mayor que el obtenido para la carga de 10 N, lo cual se puede atribuir al considerar que con la menor carga disminuyen los puntos de contacto entre ambas superficies.
- ✓ La pérdida de masa y por lo tanto el desgaste aumenta conforme se incrementa la carga normal aplicada a las superficies en contacto.

RECOMENDACIONES

Para continuar con esta investigación se recomienda:

- ✓ Dar continuidad al proceso de creación de una base de datos de desgaste en pares de materiales que se utilizan comúnmente en el país y de los cuales no se disponen referencias bibliográficas.
- ✓ Propiciar otras investigaciones del estudio tribológico de una espiga de acero 01 sobre un disco de acero AISI 1020 cementados en donde se estudie el efecto de los lubricantes.

REFERENCIAS

- Apraiz Barreiro, J. (1949). *Tratamiento Térmico de los Aceros*. Madrid.
- Archard, J. F. (1957). Proceedings of the Royal Society A.
- Artiga, J. C., Hernández, L. M. & Mezquita, D. V. (2002). *Elaboración de un manual para la selección de variables del proceso de cementación sólida*.
- Askeland, D. R. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*.
- Avner, S. H. (1988). *Introducción a la Metalurgia Física*.
- Bowden, F. P. & Tabor, D. (1939). Proceedings of the Royal Society A.
- García, J. E., González, E. R. & Villatoro, R. C. (2003). *Diseño y construcción de una máquina para ensayo de desgaste tip espiga sobre disco*. San Salvador.
- Greenwood, J. A. & Williamson, J. B. (1966). *Proceedings of the Royal Society A*.
- Halliday, J. S. (1955). Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers.
- Halling, J. (1975). *Principles of Tribology*. The Macmillan Press.
- Holm, R. (1946). *Electrical Contacts*. Stockholm.
- Lajtin, Y. & Arzamazov, B. (1987). *Tratamiento Químico Térmico de los Metales*. Moscú: MIR.
- Sampén, L. (s.f.). Pautas Para el Diseño de Partes Metálicas Resistentes al Desgaste.
- Sarkar, A. D. (1990). *Desgaste de Metales*. México D.F.; México: Limusa.
- Staia, M. H., Puchi-Cabrera, E. S., Carrasquero, E., Santana Mendez, Y. Y., La Barbera Sosa, J. G. & Chicot, D. &. (2013). Sliding wear of a-C:H coatings against alumina in corrosive media. *Elsevier* .