

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



**ESTUDIO DE DESGASTE DE ESPIGAS DE ACERO AISI O1
TEMPLADAS Y REVENIDAS A BAJA TEMPERATURA CON
PUNTA SEMIESFÉRICA Y DISCOS DE ACERO AISI 1020
RECOCIDOS**

PRESENTADO POR:
JOSÉ LUIS GARCÍA QUIJANO

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE DE 2020

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

M.Sc. ROGER ARMANDO ÁRIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL :

M.Sc. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

PhD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR :

Ing. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ

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 DE ESPIGAS DE ACERO AISI O1
TEMPLADAS Y REVENIDAS A BAJA TEMPERATURA CON
PUNTA SEMIESFÉRICA Y DISCOS DE ACERO AISI 1020
RECOCIDOS**

Presentado por :
JOSÉ LUIS GARCÍA QUIJANO

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :
Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

San Salvador, septiembre de 2020

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:

José Luis García y Vilma Quijano

Mis hermanas:

Nuvia García y Cindy García

José

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco a Dios por la salud, fortaleza y protección que me brindó; a mis padres y mis hermanas por toda la paciencia y el apoyo incondicional que me han brindado durante el desarrollo de mi formación profesional.

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 guiarme.

A todos los profesores e instructores que aportaron a mi formación académica en especial a los docentes de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

A mis amigos y compañeros de estudio especialmente a Valeria Lazo por haber compartido todos estos años de estudio y su apoyo incondicional en este proceso.

Agradezco a la ASEIM, que me ayudó a desarrollarme en diferentes ámbitos durante todos estos años y donde conocí personas excepcionales que me brindaron su ayuda desinteresada. Al Centro de Investigación Científica (CIC-UES), por el equipamiento mediante el proyecto 12.10. Al personal del Centro de Investigaciones de Metrología de la Universidad de El Salvador (CIM-UES), por su valiosa colaboración en las determinaciones de las masas y a la unidad productiva por su ayuda y enseñanza en el uso de herramienta y equipos.

José

ESTUDIO DE DESGASTE DE ESPIGAS DE ACERO AISI O1 TEMPLADAS Y REVENIDAS A BAJA TEMPERATURA CON PUNTA SEMIESFÉRICA Y DISCOS DE ACERO AISI 1020 RECOCIDOS

Estudiante: Br. José Luis García Quijano¹

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 conducido una investigación sobre desgaste por medio de la ejecución de ensayos tipo espiga sobre disco, utilizado discos de acero AISI 1020 recocido y espigas de un acero AISI O1 con tratamiento térmico de temple y revenido a baja temperatura. Los ensayos se realizaron bajo diferentes combinaciones de condición de carga y distancia de deslizamiento, obteniendo de esta forma 6 condiciones experimentales diferentes, es decir para cada condición de ensayo se realizaron 3 experimentos. Se determinó la dureza de los discos. Se obtuvo un incremento del desgaste de los discos a medida se incrementaba la carga y la distancia de deslizamiento tal como se cita en la literatura. Finalmente se realizó un análisis de estudios de desgaste aplicados al acero AISI 1020 considerando los resultados obtenidos y las variables involucradas.

Palabras claves: Temple y revenido, Desgaste y Dureza.

1 garciajose@gmail.com

2 jonathan.berrios@ues.edu.sv

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1 MARCO TEÓRICO	3
1.1 Desgaste en metales	3
1.1.1 Tipos de desgaste.....	4
1.1.2 Topografía de la superficie.....	5
1.1.3 Contacto de sólidos.....	8
1.1.4 Fricción.....	12
1.1.5 Teoría molecular de la fricción y del desgaste	15
1.1.6 Desgaste inicial	17
1.1.7 Transferencia de metales durante el desgaste	18
1.1.8 Efecto de la temperatura y la velocidad	19
1.1.9 Tipos de máquinas para realizar ensayos de desgaste	24
1.1.10 Normas astm para ensayos de desgaste.....	25
1.2 Procesos de cementación.....	26
1.2.1 Cementación sólida.....	28
1.2.2 Cementación líquida.....	33
1.2.3 Cementación gaseosa.....	38
1.2.4 Tratamientos térmicos posteriores	42
1.3 Estudios de desgaste en acero aisi 1020.....	43
1.3.1 evaluación del desgaste adhesivo del acero aisi 1020.....	44
1.3.2 comportamiento del coeficiente de fricción y pérdida de masa, del acero 1020 en estado comercial.....	47
1.3.3. Análisis de la resistencia al desgaste abrasivo de un acero aisi 1020 templado a una temperatura de 800 °c y revenido a diferentes temperaturas	50
1.3.3 Evaluación de la resistencia al desgaste adhesivo del acero aisi 1020 cementado con carbón obtenido a partir de la biomasa de café.....	52
1.3.4 Estudio de desgaste tipo espiga sobre disco, utilizando un acero aisi 1020 cementado y un acero aisi o1.....	55

2	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	60
2.1	Diagrama de flujo de la metodología experimental	60
2.2	Dimensionamiento de los discos y espigas para los ensayos de desgaste	62
2.3	Maquinado de las probetas	63
2.4	Tratamiento térmico de los discos.....	64
2.5	Tratamiento térmico de las espigas	66
2.6	Determinación de dureza	67
2.7	Preparación previa al ensayo de desgaste tipo espiga sobre disco.....	68
2.8	Ensayo de desgaste tipo espiga sobre disco	69
3	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	74
3.1	Determinación de la dureza	74
3.2	Resultados de los ensayos de desgaste.....	75
3.3	Análisis de resultados	80
3.3.1	Análisis estadístico de desgaste	80
3.3.2	Análisis del coeficiente de fricción.....	83
4	COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE DESGASTE EN ACERO AISI 1020	85
4.1	Coeficiente de fricción.....	85
4.2	Determinación de dureza.....	86
4.3	Pérdidas de masa	87
	CONCLUSIONES.....	89
	BIBLIOGRAFÍA	91

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, (c) Superficie plana rugosa, (d) Superficie plana rugosa de longitud de onda macrogeométrica, y (e) Superficie plana rugosa de longitud microgeométrica.....	7
Fig. 1.2. Pendiente de las asperezas de una superficie erosionada.....	8
Fig. 1.3. Asperezas superficiales. R_t es la altura máxima entre crestas y valles.....	9
Fig. 1.4. Cuerpo hemisférico que presiona una superficie plana.....	10
Fig. 1.5. Esfera con asperezas de diferentes tamaños.....	11
Fig. 1.6. Superficie rugosa idealizada penetrada por una superficie plana.....	12
Fig. 1.7. Una superficie real penetrada por una superficie plana.....	12
Fig. 1.8. 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.....	13
Fig. 1.9. Curva característica de desgaste contra distancia de deslizamiento.....	18
Fig. 1.10. Variación entre el tiempo de desgaste y la transferencia de metal de una espiga de latón que se desliza sobre un anillo de estelita.....	20
Fig. 1.11. Variación de la razón de desgaste con la temperatura para un latón (60/40), sobre acero para herramientas.....	22
Fig. 1.12. Gráfica de la razón de desgaste en relación con el recíproco de la dureza.....	23
Fig. 1.13. Variación de la razón de desgaste y la transferencia de metal con la velocidad. Carga 22.5 kg.....	24
Fig. 1.14. Variación de la razón de desgaste y la temperatura superficial con velocidad para espigas aisladas térmicamente y enfriadas. Carga 3 kg.....	25
Fig. 1.15. Máquina de espiga sobre disco.....	26
Fig. 1.16. Diagrama de equilibrio para la reacción $2CO \rightleftharpoons CO_2 + C$	32
Fig. 1.17. Dependencia de la norma de consumo del carburante vegetal, respecto al volumen ocupado por la pieza en la caja de cementación.....	33

Fig. 1.18. Consumo del carburante en función del diámetro o lado del cuadrado de las piezas de la barra sólida. Las líneas llenas corresponden a las piezas de sección redonda y las de trazos a las de sección cuadrada. Los valores designan el espaciamiento entre las piezas y la caja.....	33
Fig. 1.19. Norma de consumo del carburante en función del diámetro exterior de las piezas cilíndricas huecas. Las cifras que marcan las curvas corresponden a los espesores de pared de las piezas.....	34
Fig. 1.20. Espesor de la caja cementada en función del tiempo que dura la saturación en el proceso de cementación con carburante sólido a 930 °C en condiciones de producción.....	34
Fig. 1.21. Profundidad de la capa cementada con más de 0.30% de carbono en función de la temperatura y del tiempo en un acero de 0.10% de carbono cementado con sales de penetración media (20 % de CNNa).....	38
Fig. 1.22. Profundidad de la capa cementada con más de 0.30 % de carbono en función de la temperatura y del tiempo, en un acero de 0.10 % de carbono cementado con sales de gran penetración (10 % de CNNa).....	38
Fig. 1.23. Tratamientos térmicos posteriores a la cementación.....	43
Fig. 1.24. Gráficas de desgaste de acero AISI 1020 (a) curva de desgaste vs tiempo, (b) curva de coeficiente de fricción vs tiempo.....	47
Fig. 1.25. Gráfica de Coeficiente de fricción vs Tiempo de acero AISI 1020.....	49
Fig. 1.26. Gráficas de desgaste de acero AISI 1020, (a) pérdida de volumen por desgaste abrasivo, (b) comparativo de resistencia al desgaste abrasivo...	52
Fig. 1.27. Curvas de desgaste respecto a la distancia de deslizamiento.....	59
Fig. 2.1. Diagrama de flujo de la metodología experimental.....	62
Fig. 2.2. Dimensiones de los especímenes a utilizar en el ensayo tipo espiga sobre disco, medidas en mm.....	63
Fig. 2.3. Maquinado de los discos en un torno convencional.....	65
Fig. 2.4. Cámara de gas inerte utilizada durante el tratamiento térmico de los discos.....	66
Fig. 2.5. Curva de variación temperatura-tiempo para el tratamiento térmico de temple y revenido de las espigas de acero AISI O1.....	67
Fig. 2.6. Disco de acero AISI 1020 tras el proceso de lijado.....	69
Fig. 2.7. Módulo para ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco marca GUNT, TM 260.3.....	70
Fig. 2.8. Módulo para ensayos tipo espiga sobre disco con sus principales componentes señalados.....	71

Fig. 2.9. Durómetro marca INNOVETEST.....	74
Fig. 2.10. Posicionamiento de la probeta durante la prueba de dureza.....	75
Fig. 3.1. Curvas de coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento de ensayos de desgaste de espigas de acero AISI O1 sobre discos de acero AISI 1020, con carga de 5 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.....	79
Fig. 3.2. Curvas de coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento de ensayos de desgaste de espigas de acero AISI O1 sobre discos de acero AISI 1020, con carga de 10 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.....	79
Fig. 3.3. Curvas de coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento de ensayos de desgaste de espigas de acero AISI O1 sobre discos de acero AISI 1020, con carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.....	80
Fig. 3.4. Curvas de coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento de ensayos de desgaste de espigas de acero AISI O1 sobre discos de acero AISI 1020, con carga de 5 N y distancia de deslizamiento de 1500 m.....	80
Fig. 3.5. Curvas de coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento de ensayos de desgaste de espigas de acero AISI O1 sobre discos de acero AISI 1020, con carga de 10 N y distancia de deslizamiento de 1500 m.....	81
Fig. 3.6. Curvas de coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento de ensayos de desgaste de espigas de acero AISI O1 sobre discos de acero AISI 1020, con carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 1500 m.....	81
Fig. 3.7. Curvas de pérdida de masa en discos de acero AISI 1020 con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida de 1000 y 1500 m, con cargas de 5, 10 y 15 N.....	83
Fig. 3.8. Curvas de pérdida de masa en espigas de acero AISI O1 con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida de 1000 y 1500 m, con cargas de 5, 10 y 15 N.....	84

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Composición de las sales empleadas para la cementación de los aceros.....	36
Tabla 1.2. Promedios de dureza (Vickers).....	52
Tabla 1.3. Parámetros de tratamientos térmicos aplicados a los discos de acero AISI 1020.....	54
Tabla 1.4. Dureza de los discos de acero AISI 1020 con tratamiento térmico..	55
Tabla 1.5. Condiciones y variables bajo las que se realizan los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco.....	57
Tabla 1.6. Medición de dureza Rockwell C.....	58
Tabla 2.1. Composición química de los aceros a estudiar en condiciones de entrega.....	64
Tabla 2.2. Condiciones y variables bajo las que se realizan los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco.....	71
Tabla 3.1 Medición de dureza Rockwell B.....	76
Tabla 3.2. Valores de desgaste en los discos de acero AISI 1020.....	78
Tabla 3.3. Valores de desgaste de las espigas de acero AISI O1.....	78
Tabla 3.4. Valores de desgaste de los discos para los ensayos realizados.....	83
Tabla 3.5. Valores de desgaste de las espigas para los ensayos realizados...	84
Tabla 3.6. Valores promedio del coeficiente de fricción entre pares discos de acero AISI 1020 y espigas de acero AISI O1 respectivamente.....	85

SÍMBOLOS Y SIGLAS

A_e : Área de contacto elástica

ASTM: Sociedad Americana para Pruebas y Materiales

A_t : Área de contacto real

E : Módulo de Young

E_t : Energía total disipada

F_e : Carga normal aplicada

f_f : Resistencia a la fricción

n : Número de asperezas por unidad de áreas

P : Factor de compresión

r : Radio

R_a : Línea central media

R_t : Altura máxima entre crestas y valles

R_s : Raíz media cuadrática

S : Distancia de deslizamiento

t : Tiempo

v : Velocidad de deslizamiento

α : Factor de probabilidad

ρ : Densidad del metal

μ : Coeficiente de fricción

σ_y : Esfuerzo de fluencia

τ : Esfuerzo cortante

ω : Velocidad angular

INTRODUCCIÓN

El proceso de desgaste en los elementos de máquinas se produce 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 éstas, en su mayoría de aplicaciones, se encuentran sujetas a movimientos relativos entre sus superficies.

Uno de los métodos utilizados para disminuir el efecto del desgaste en piezas de máquinas es la cementación que se define como un tratamiento termoquímico que consiste en carburar una capa superficial de una pieza de acero de bajo carbono, la cual se obtiene rodeándola de un producto carburante y calentándola a una temperatura adecuada en la cual mediante difusión modifica su composición impregnando una capa superficial y a continuación sometiéndola a un tratamiento térmico de temple y revenido, quedando la pieza con buena tenacidad en el núcleo y con alta dureza superficial.

A nivel experimental se puede determinar el comportamiento al desgaste entre dos materiales utilizando diferentes equipos de ensayos, así los parámetros de operación de estos equipos permiten crear las condiciones de simulación necesarias para analizar con certeza el comportamiento al 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, la cuál será utilizada en el presente trabajo para caracterizar el comportamiento al desgaste entre el par de material acero AISI 1020 y un acero AISI O1 bajo diferentes parámetros de ensayo.

El primer capítulo, de este trabajo, inicia con la definición del proceso de cementación, sus generalidades y los diferentes procesos en los cuales se puede realizar la cementación sólida, líquida y gaseosa, también el post-tratamiento térmico que se debe aplicar. Además, se presenta una leve descripción al

proceso de desgaste, se describen los tipos de ensayos para el estudio del desgaste y se hace especial énfasis en el ensayo tipo espiga sobre disco, ya que es el que se utilizará para la ejecución de la presente investigación y, por lo tanto, también se hace mención de las normas que rigen dicho ensayo. Finalmente, se incluye una sección referente a una descripción de diferentes tipos de ensayos de desgaste que han sido aplicados al acero AISI 1020, sus resultados obtenidos y los parámetros que se consideraron para su ejecución.

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 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 con una breve descripción de la forma como se tomarán los datos.

En el tercer capítulo se presentan los resultados obtenidos durante el desarrollo experimental, iniciando con la determinación de dureza de los especímenes, 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 masa tanto de los discos como de las espigas y estableciendo la relación del desgaste con la carga aplicada para cada distancia de deslizamiento. 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.

En el cuarto capítulo se realiza un análisis de los resultados obtenidos en las diferentes investigaciones realizadas en el acero AISI 1020 referentes al desgaste considerando la dureza obtenida de los diferentes tratamientos térmico aplicado, el comportamiento del coeficiente de fricción obtenido y la pérdida de masa reportada por las diferentes variables aplicadas y equipos utilizados.

1 MARCO TEÓRICO

En 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 se presenta un apartado referente al tratamiento termoquímico de cementación, finalizando con una breve descripción de los diferentes ensayos de desgaste que han sido aplicados al acero AISI 1020.

1.1 DESGASTE EN METALES

La calidad de la mayoría de los productos metálicos depende de las condiciones de sus superficies y el deterioro de ésta, debido al uso al cual ha sido sometido. Este deterioro es importante en la práctica de la ingeniería; éste suele ser el factor principal que limita la vida y el desempeño de los componentes de una máquina [1].

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 [2]. 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 producir una combinación de los mismos o el desgaste se puede producir debido a un movimiento oscilatorio de pequeñas amplitudes [3].

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 (desgaste adhesivo o metálico).
- b) Metal contra sólido no-metálico (abrasión).
- c) Metal contra fluido (erosión).

Dicha clasificación 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 [3]:

1) 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 ambas 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 en forma de partículas de una superficie hacia la otra o se encuentran como partículas sueltas fuera de dicha superficie.

2) Desgaste por abrasión, tiene lugar siempre que estén presentes partículas extrañas con alta dureza 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.

- 3) 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 falla por fatiga. El grado de desgaste tiene relación con el ángulo de incidencia de la partícula con respecto a la superficie.
- 4) 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.
- 5) Desgaste por cavitación**, se origina en superficies entre las que existe presencia de un 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 aplastando bruscamente las burbujas las cuales, si se encuentran cerca o en contacto de una superficie, al cambiar de estado produce presiones muy altas, ocasionando picaduras en dicha superficie.
- 6) 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.

1.1.2 TOPOGRAFÍA DE LA SUPERFICIE

Con la finalidad de comprender la interacción entre las superficies de las partes móviles de una máquina, por lo tanto, es de importancia conocer la naturaleza original de dichas superficies, si éstas se encuentran libres de

contaminantes u óxidos y si es mecánicamente suave. Pero lo primordial para comprender los mecanismos de fricción y desgaste es conocer que no existe una superficie perfectamente plana a escala microscópica [3].

La obtención de una superficie perfectamente lisa no es posible mediante los métodos convencionales de preparación de superficies como son el maquinado, pulido, cepillado, entre otros. Ya que estas suelen presentar asperezas, es decir ondulaciones en la forma de colinas y valles. En la Fig. 1.1 se presenta diferentes tipos de asperezas de una superficie, en el caso de la Fig. 1.1a se presenta una superficie perfectamente lisa, para el caso de las Fig. 1.1b-e poseen protuberancias todas de la misma profundidad, aunque la longitud de onda es macro geométrica 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 micro geométrica, como en el caso de la Fig. 1.1e la longitud de onda es corta o micro geométrica, a esta superficie se le define plana pero rugosa. En las Fig. 1.1c-d se presentan superficies cuya rugosidad están entre la Fig. 1.1b y d [3].

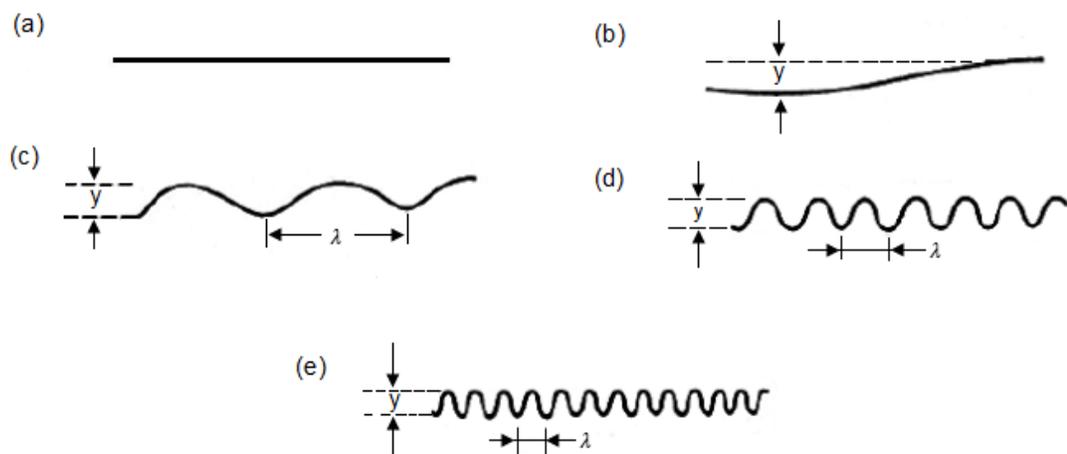


Fig. 1.1. Diferentes tipos de asperezas de una superficie que presenta la misma altura entre cresta y valles, pero diferentes longitudes de onda: (a) Superficie lisa, (b) Superficie lisa pero no plana, (c) Superficie plana rugosa, (d) Superficie plana rugosa de longitud de onda macro geométrica, y (e)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

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. 1.2 se presenta la naturaleza de las pendientes de las asperezas donde el ángulo α anterior a la partícula abrasiva siempre es mayor que el ángulo 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 [4].

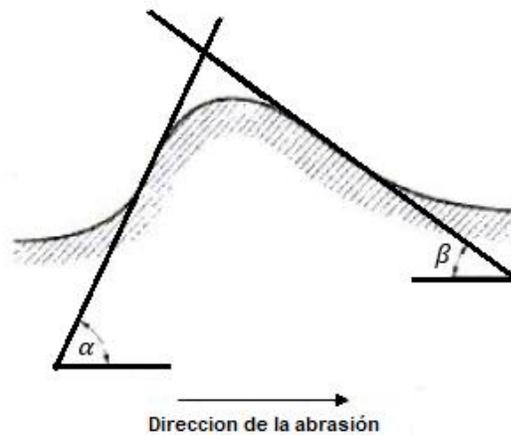


Fig. 1.2. Pendiente de las asperezas de una superficie erosionada.

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

- 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.

Las superficies con diversos grados de rugosidad pueden tener el mismo valor de altura máxima de una cresta a un valle R_t , así que la medición de la altura entre cresta y valle no describe totalmente una superficie [3].

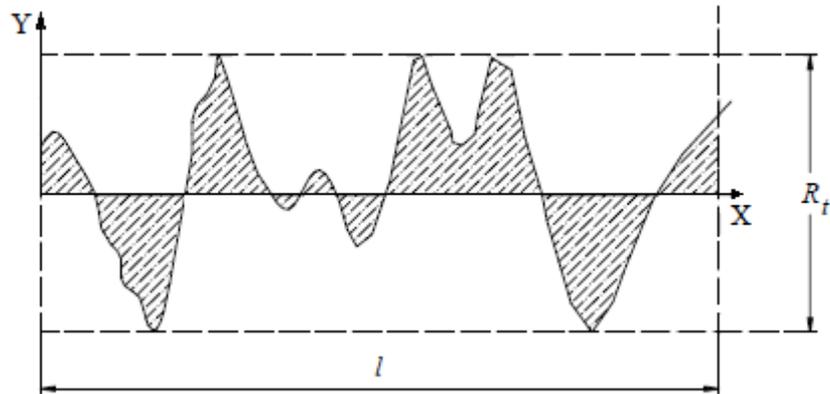


Fig. 1.3. Asperidades superficiales. R_t es la altura máxima entre crestas y valles.

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 para una longitud están dados por las Ecs. 1.1 y 1.2, respectivamente [3].

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

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

1.1.3 CONTACTO DE SÓLIDOS

Si se presiona una superficie sobre la otra, la carga es soportada por los bordes de unas cuantas crestas en la superficie inferior, suponiendo que el miembro superior del par metálico en contacto sea perfectamente plano. Por lo tanto, existe un área de contacto aparente en la interface de ambas superficies, aunque en la punta de las asperezas el área real de contacto sólo es de unos

cuantos puntos. Si la carga es baja y el material tiene un alto esfuerzo de fluencia, el contacto será elástico en caso opuesto la interface fluirá plásticamente [3].

Si se considera que un cuerpo hemisférico duro se desliza sobre una superficie blanda y lisa bajo la acción de una carga (F) tal como se presenta en la Fig. 1.4, y se supone que la espiga y la superficie plana 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 [3].

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

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.

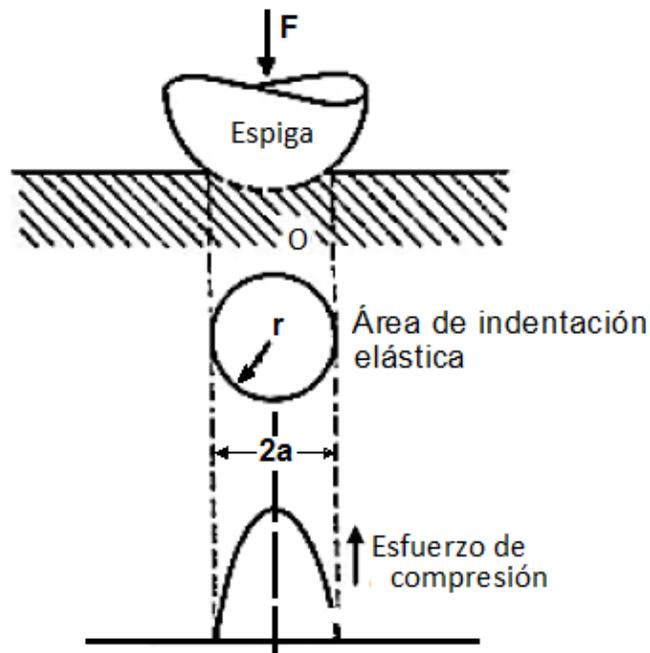


Fig. 1.4. Cuerpo hemisférico que presiona una superficie plana.

Sin embargo, las superficies ingenieriles, como es el caso de una espiga hemisférico que presione una superficie blanda, 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. 1.5, Archard demostró que si se consideran las asperezas y se toma en cuenta la rugosidad de estas protuberancias y el análisis se realiza en forma sucesiva de llega a una etapa en que el área de contacto elástico llega a ser casi proporcional a la carga normal aplicada [5].

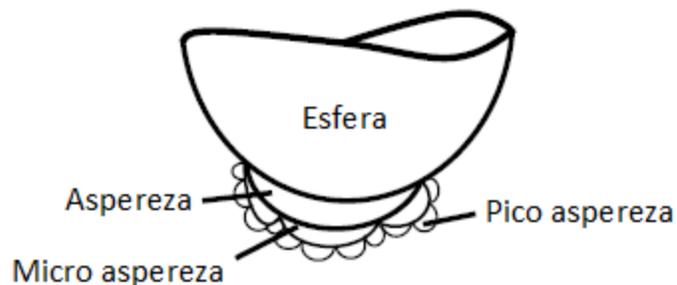


Fig. 1.5. Esfera con asperezas de diferentes tamaños.

Dejando de lado la presencia de microasperezas, Halling idealizó una superficie rugosa con asperezas perfectamente esféricas, cada una de radio R como se presenta en la Fig. 1.6. Otra suposición que se realizó 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. La altura de cada aspereza desde una línea de referencia arbitraria "XX" es z y la deformación es igual a $(z-d)$. Así, estas suposiciones sirvieron para demostrar que cuando el contacto es elástico, el área real de contacto no es directamente proporcional a la carga normal aplicada. A partir de lo cual se dedujo la Ec. 1.4 [6].

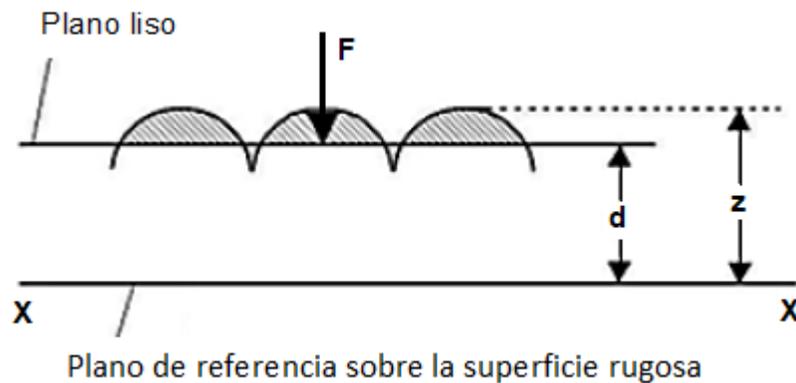


Fig. 1.6. Superficie rugosa idealizada penetrada por una superficie plana.

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

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:

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

El análisis anterior se basó en una distribución de aspereza idealizada, pero las superficies reales tienen asperezas de altura variable y distribución aleatoria, tal como se presenta en la Fig. 1.7.



Fig. 1.7. Una superficie real penetrada por una superficie plana.

1.1.4 FRICCIÓN

Cuando una superficie se coloca sobre otra, es necesario aplicar una fuerza horizontal finita para iniciar el deslizamiento. Esta fuerza horizontal es la fricción estática entre ambas superficies cuya magnitud depende de la limpieza de la interface, entre otros factores, por lo tanto, la fricción entre dos cuerpos es alta en el vacío. La fuerza necesaria para mantener el deslizamiento debe ser mayor que la fricción cinética entre las dos superficies [3].

Bowden y Tabor consideran la resistencia a la fricción entre dos superficies como la suma de dos componentes: una a cortante y otra de compresión [7]. Así, si nuevamente se considera que una espiga hemisférica se apoya sobre una superficie plana bajo la acción de una carga normal (F), esto ocasiona 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. 1.8a. Sea f_f la resistencia a la fricción, que es la fuerza tangencial necesaria para iniciar el deslizamiento como se presenta en la Fig. 1.8b [3].

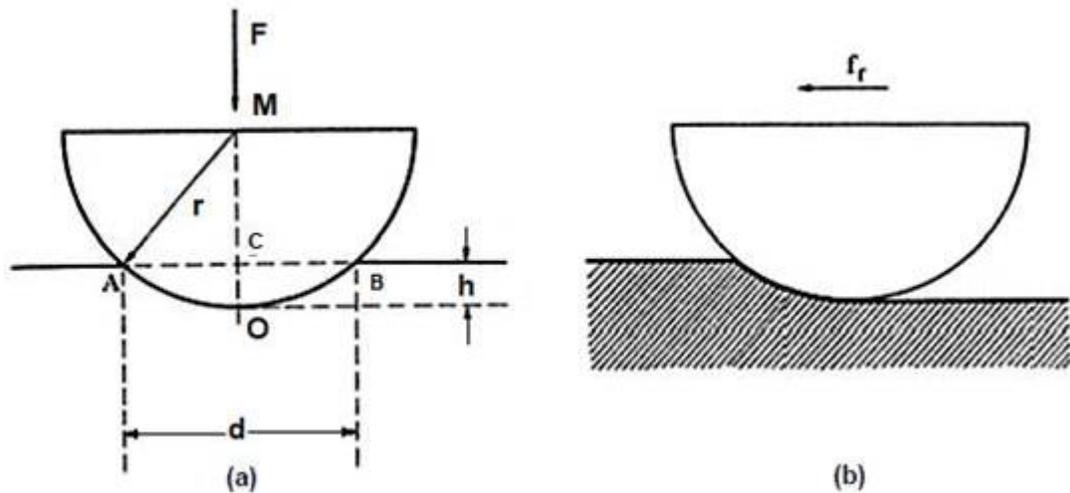


Fig. 1.8. Una espiga hemisférica se desliza sobre una superficie suave bajo la acción de una carga: (a) Espiga estacionaria; y (b) Espiga en movimiento, produciendo una huella en forma de ranura.

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.

Lo anterior 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, se requiere de una fuerza adicional para desplazar la pared de metal delante de ella en la dirección del movimiento, 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. 1.8a y está dada por la Ec. 1.8:

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

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

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

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:

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

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. 1.10 se puede despreciar y el factor de compresión se hace insignificante. En este caso se tiene la Ec. 1.11:

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

Por otra parte, el coeficiente de fricción, μ , es la resistencia a la fricción por unidad de carga, y está dado por la Ec. 1.12:

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

Amontons postuló en 1699 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** en el año 1929. 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 [8].

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 antes de volver a su posición original de equilibrio, así el átomo en tránsito queda sujeto a una atracción establecida 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 pérdida es nE , la cual es igual al trabajo mecánico realizado que se expresa por μPx , por lo tanto, la Ec. 1.13 plantea que:

$$\mu = \alpha \frac{F_0 \ell}{ep_0} \quad (1.13)$$

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, de la Ec. 1.13 se 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** [8], éste es el mecanismo del desgaste, la Ec. 1.14 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 presenta que la masa total de material eliminado es inversamente proporcional al esfuerzo de fluencia.

1.1.6 DESGASTE INICIAL

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. 1.9. El punto O corresponde al encendido de la máquina; es decir, cuando la distancia de deslizamiento es cero [3].

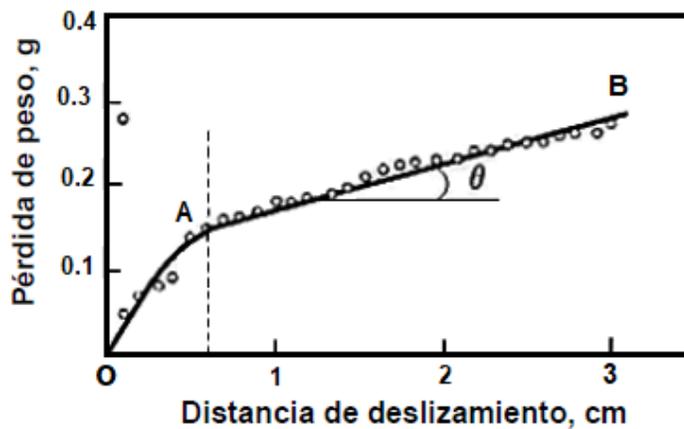


Fig. 1.9. Curva característica de desgaste contra distancia de deslizamiento.

En la Fig. 1.9 se presenta el patrón de una curva de desgaste típica, la pérdida de peso es curvilínea y su relación por unidad de distancia de deslizamiento disminuye hasta que se une suavemente en A con la recta AB. La cantidad de pérdida de volumen en el régimen determinado por AO es el desgaste en el arranque inicial y AB es el estado estacionario. La pendiente del régimen estacionario es lineal y se utiliza para expresar la razón de desgaste de un material por unidad de distancia de deslizamiento, y a una carga y velocidad dada es constante para cada material, dependiendo de la naturaleza de la otra superficie [3].

Se puede establecer una ecuación matemática 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. 1.15:

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

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.

1.1.7 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 [3].

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. 1.10 se presenta que el primer efecto del deslizamiento es que la espiga se desgasta con mayor rapidez, sin embargo, se llega a una etapa de equilibrio cuando la rapidez de transferencia del metal, así como el desgaste alcanzan un valor constante, por ende, Se logró deducir que existían dos mecanismos básicos de desgaste:

- 1) Transferencia de metal seguida de abrasión. y
- 2) Proceso en una sola etapa de abrasión directa.

Ambos mecanismos podrían operar simultáneamente durante toda la interacción de interface.

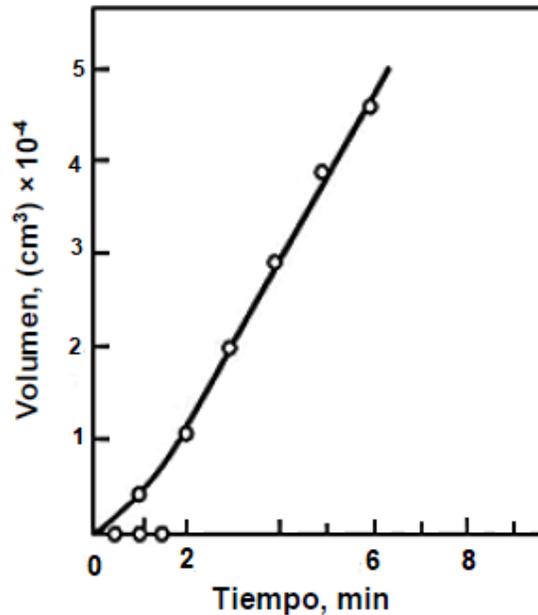


Fig. 1.10. Variación entre el tiempo de desgaste y la transferencia de metal de una espiga de latón que se desliza sobre un anillo de estelita.

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, se logra demostrar que un fragmento de desgaste que se desprende de las superficies es ~8 veces el área de la partícula transferida y 6 veces su espesor [3].

1.1.8 EFECTO DE LA TEMPERATURA Y LA VELOCIDAD

Se ha demostrado que la fricción y el desgaste de los metales dependen principalmente de la interacción de asperezas entre otras dos superficies

deslizantes, la energía disipada debida al trabajo mecánico inevitablemente ocasiona un incremento en la temperatura, pero esto sucede de manera intermitente en lo que se refiere a los puntos de contacto real debido a la adherencia y posterior deslizamiento de las uniones. Estos incrementos momentáneos de temperatura tienen una duración del orden de 10^{-4} s. El calor desprendido durante 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 aumenta la temperatura de las uniones y en casos extremos puede causar fusión incipiente [3].

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 [3].

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. 1.11, y al sobrepasar el valor máximo se tiene una caída en la razón de desgaste del latón [9].

En la Fig. 1.11 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 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 [3].

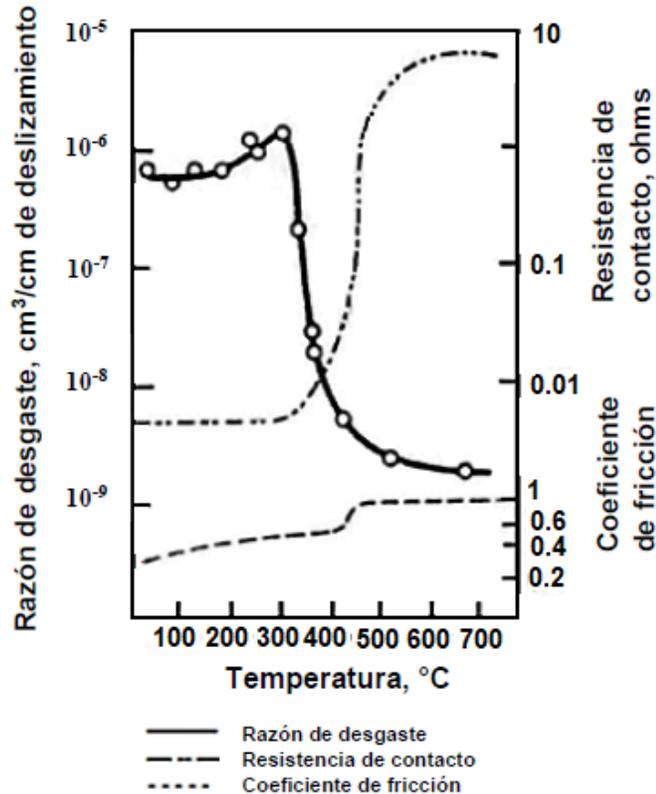


Fig. 1.11. Variación de la razón de desgaste con la temperatura para un latón (60/40), sobre acero para herramientas.

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 [3].

Hughes y Spurr efectuaron 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. También, si se grafica la razón de desgaste contra el recíproco de la dureza medida, se obtiene una relación lineal, como se presenta en la Fig. 1.12 [10].

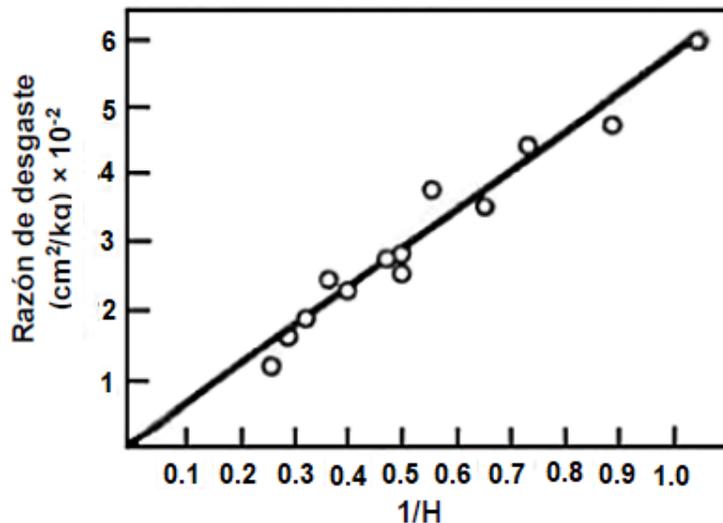


Fig. 1.12. Gráfica de la razón de desgaste en relación con el recíproco de la dureza.

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, aumentando 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 [3].

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. 1.13 se presenta variaciones de razón de desgaste con una carga de 22.5 kg aplicándole incrementos de velocidad y se aprecia un

decremento seguido de un incremento en la razón de pérdida de metal cuando se sobrepasa una velocidad aproximada 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. 1.13 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 [3].

Así, en la Fig. 1.14 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 [3].

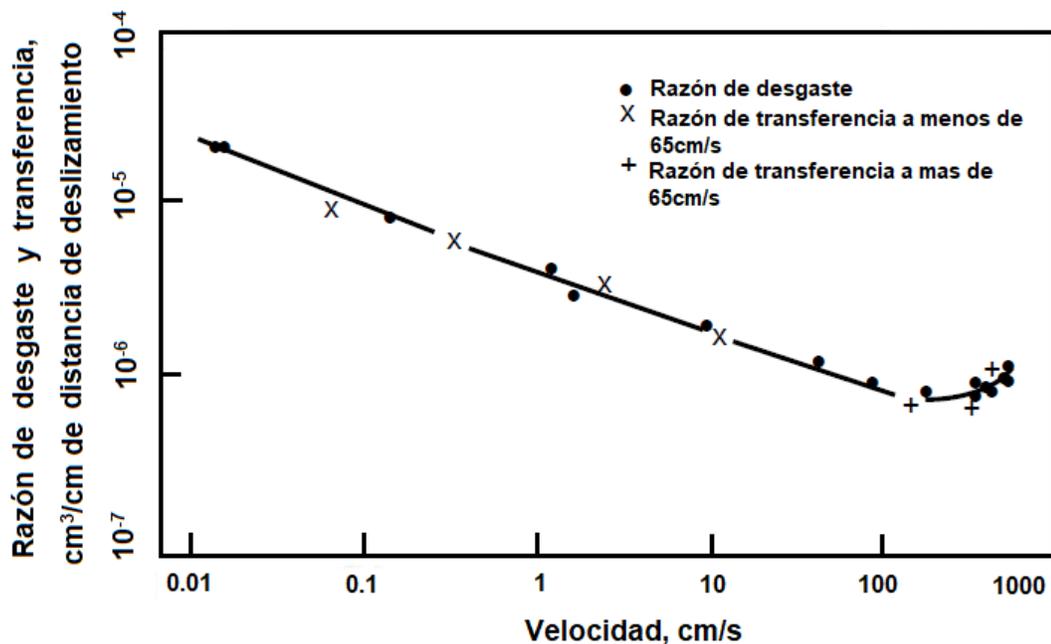


Fig. 1.13. Variación de la razón de desgaste y la transferencia de metal con la velocidad. Carga 22.5 kg.

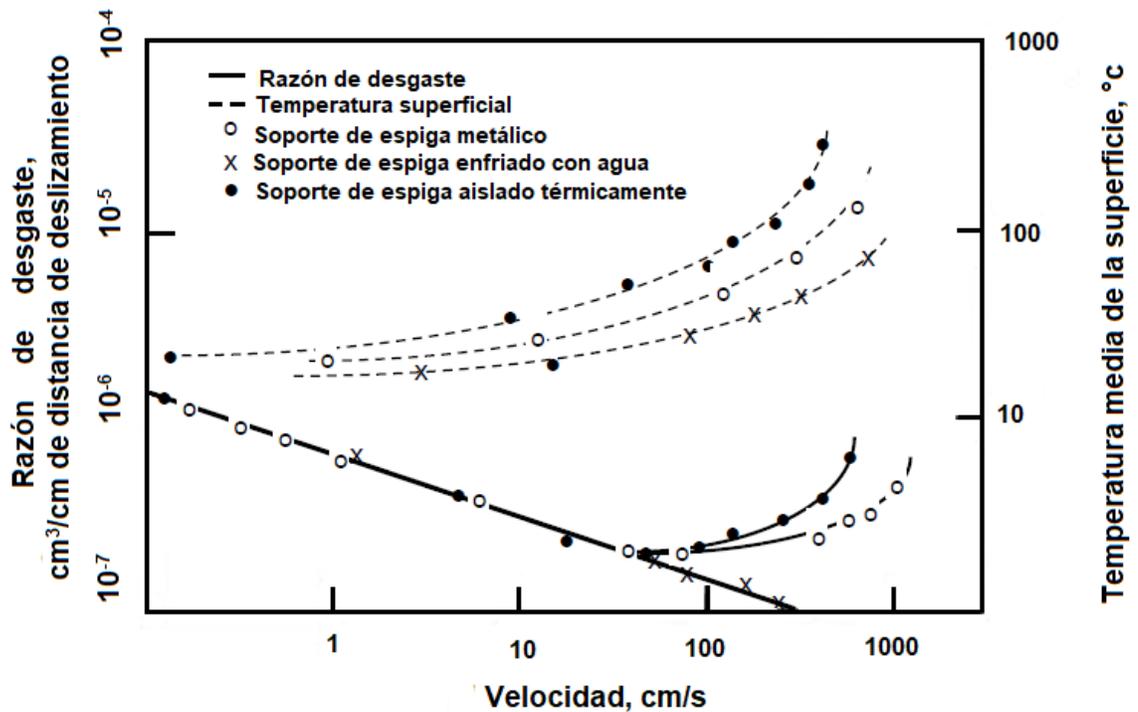


Fig. 1.14. Variación de la razón de desgaste y la temperatura superficial con velocidad para espigas aisladas térmicamente y enfriadas. Carga 3 kg.

1.1.9 TIPOS DE MÁQUINAS PARA REALIZAR ENSAYOS DE DESGASTE

Existen diferentes tipos de máquinas utilizadas para realizar ensayos de desgaste entre las cuales cabe citar: espiga sobre mesa oscilante, espiga sobre buje, cilindros cruzados, espiga sobre cilindro, máquina de cuatro bolas, máquina de discos. En el mismo sentido, la máquina que se seleccionará en esta investigación es la máquina de espiga sobre disco, la cual es usada para pruebas de desgaste, en ella la espiga (1) se coloca perpendicularmente a un disco giratorio (2), tal como se presenta en la Fig. 1.15. 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 antes y posterior al ensayo de desgaste.

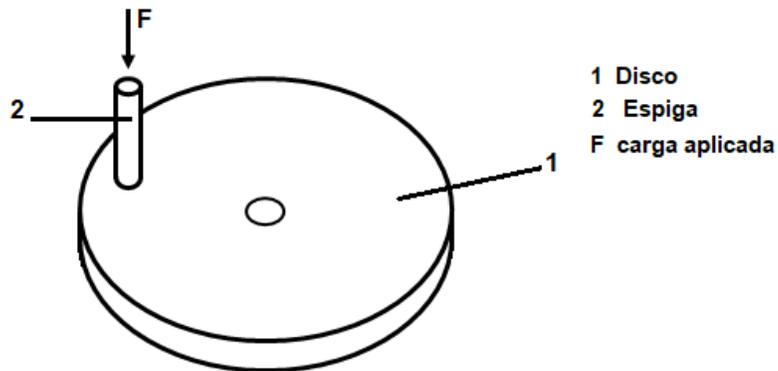


Fig. 1.15. Máquina de espiga sobre disco.

1.1.10 NORMAS ASTM PARA ENSAYOS DE DESGASTE

Los ensayos de desgaste con máquinas tipo espiga sobre disco están regidos por la norma de la ASTM designación G 99, en ésta 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 [6]:

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 Normas.

- ✓ DIN-50324. Ensayos de fricción y desgaste.

Para el ensayo de desgaste tipo espiga sobre disco se requieren dos muestras, una espiga con punta hemisférica se coloca perpendicularmente sobre un disco. La máquina de ensayo define la trayectoria de deslizamiento en un

círculo generado en la superficie del disco. El plano del disco puede estar orientado horizontal o verticalmente [11].

La espiga normalmente se presiona contra el disco a una carga específica generalmente por medio de un brazo o palanca a la cual se le agregan pesos. Se pueden utilizar otros métodos de carga tales como: hidráulico o neumático [11].

1.2 PROCESOS DE CEMENTACIÓN

La cementación es el método más antiguo de endurecimiento superficial, utilizado en un grupo de aceros de bajo contenido de carbono generalmente de entre 0.05 a 0.25%. Este método consiste en colocar el acero en una atmósfera que contiene grandes cantidades de monóxido de carbono, a temperaturas comprendidas entre 850 y 1000 °C siendo generalmente las temperaturas próximas a 900 °C las más utilizadas [12].

Una pieza después de cementada se puede considerar compuesta por dos zonas principales de composición química diferentes, la periferia o capa cementada con un alto contenido de carbono otorgando una gran dureza y el alma o núcleo central con la composición inicial dando como resultado una alta tenacidad o resistencia al choque, posteriormente siendo sometida a tratamientos térmicos adecuados que sean favorable para la parte superficial que comprende la pieza [12].

Para cementar los aceros se pueden usar cementantes sólidos, líquidos o gaseosos. Durante muchos siglos los cementantes sólidos han sido los únicos que se han empleado para la cementación del acero. Los cementantes líquidos a base de cianuros de potasio y de sodio fundidos, los cuales se comenzaron a emplear en la primera mitad del siglo XX. Finalmente, los cementantes gaseosos han adquirido a partir de la segunda guerra mundial un desarrollo extraordinario y en la actualidad son los más empleados en la mayoría de las grandes y modernas instalaciones de cementar [12].

La duración de la cementación cuando se utilizan cementantes sólidos oscila entre 6 a 10 h. Cuando se trata de sales o cementantes líquidos la duración de la cementación varía de 1 a 6 h, y utilizando cementantes gaseosos varía de 1 hora a 2 días, según los casos [12].

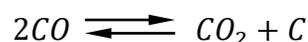
En el proceso de cementación se puede distinguir tres etapas fundamentales: 1) producción de carbono naciente en las proximidades de la superficie del acero; 2) absorción de carbono de la zona periférica del acero; 3) difusión de carbono en la zona central. En realidad, esas tres etapas se producen simultáneamente y se han señalado por separado para facilitar el estudio de las diferentes fases del proceso [12].

La cantidad y distribución del carbono absorbido por las piezas depende de: 1) la temperatura y la duración del cementado, 2) de la naturaleza de las sustancias cementantes, y 3) de la composición del acero sometido a la cementación [12].

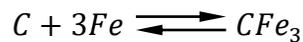
En todas las cementaciones el carbono naciente se produce normalmente por descomposición de uno de los siguientes gases: monóxido de carbono o metano [12].

El monóxido de carbono se puede producir en el interior de las cajas de cementar por la reacción o descomposición de la mezcla carburante sólida que se emplean en la operación al igual que en los baños de sales por la acción del oxígeno o dióxido de carbono sobre los cianuros o por descomposición de los cianatos [12].

El metano, que se emplea en los talleres de tratamientos térmicos, se suele recibir casi siempre en botellas y a veces puede provenir también de la descomposición de hidrocarburos más complejos que durante el proceso se descomponen en hidrógeno y metano. Las reacciones fundamentales del carbono naciente son [12]:



El carbono naciente a elevada temperatura en contacto con la pieza de acero se adhiere y luego se difunde hacia el interior, de acuerdo con la siguiente reacción:



La cual explica la formación del carburo de hierro en el proceso. Una condición fundamental para que se realice bien la difusión de este carbono hacia el interior, es que el acero se encuentra durante el proceso en estado austenítico, lo que exige un calentamiento a elevada temperatura, comprendida generalmente entre 850 y 1000 °C. Cuando el acero se encuentra a una temperatura inferior a las que se acaban de citar anteriormente, el hierro se suele presentar en forma de hierro alfa que prácticamente no puede disolver carbono. En cambio, cuando el acero se encuentra en estado austenítico, el hierro se encuentra en estado gamma que disuelve fácilmente cantidades de carbono variables desde 0.90 a 1.70 % en peso. La cementación debe hacerse por lo tanto a temperaturas superiores a A_{c3} [12].

Cuando se cementan aceros de contenido en carbono relativamente elevado (0.20 a 0.40 %) la cementación es más lenta que en los aceros de un contenido inferior de carbono, porque la velocidad de difusión del carbono es mucho menor cuando se incrementa el contenido de carbono [12].

1.2.1 CEMENTACIÓN SÓLIDA

Se utilizan diversas materias para suministrar el carbono que ha de absorber el acero durante la cementación. Las más empleadas suelen ser el carbón vegetal (de roble o abedul) en granos de 3.5 a 10 mm de diámetro, huesos calcinados, cuero, entre otros. Mesclados con carbonatos de bario, calcio o sodio.

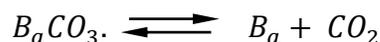
El carbón no se emplea sólo porque no se suelen conseguir concentraciones de carbono en la periferia del acero, superiores a 0.65 % de C. Sin embargo, si se mezcla con carbonatos alcalinos o alcalinotérreos, en la capa periférica se alcanzan fácilmente contenidos hasta de 1.20 % de C [12].

Durante muchos años, uno de los cementantes más utilizados fue la mezcla preparada con 60 % de carbón vegetal y 40 % de carbonato de bario. El carbón se tritura en trozos de 3 a 6 mm de diámetro y luego se mezcla con el carbonato de bario en polvo. Experimentalmente se ha comprobado que se puede disminuir el porcentaje de carbonato de bario, que se empleaba antiguamente, obteniéndose muy buenos resultados con porcentajes de 10 a 15 %, sin que pierda efecto la acción carburante de la mezcla; bajando en cambio de 8 %, el rendimiento disminuye notablemente. Como activadores también se suelen emplear, aunque menos frecuentemente, el carbonato de calcio o el carbonato de sodio. Es importante que el carbón y los demás materiales que se utilizan para preparar los cementantes sólidos estén bien secos, porque pequeñas trazas de humedad puedan dar lugar a descarburaciones locales y luego a puntos blandos en las piezas después del post tratamiento térmico [12].

Dado que las mezclas cementantes pierden con el uso su actividad es necesario renovarlas periódicamente, siendo una práctica muy corriente preparar las mezclas utilizando 80 % de la usada y 20 % de la nueva [12].

Como activadores se puede utilizar el acetato de sodio CH_3COONa o el acetato de bario $\text{Ba}\cdot(\text{CH}_3\text{COO})_2$, que poseen gran actividad a la formación de CH_4 en la caja de cementación [13].

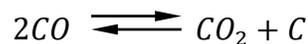
La acción activadora de los carbonatos de calcio, bario o sodio se suele explicar de formas diferentes. La teoría más antigua y las generalizadas explica el fenómeno en la siguiente forma: primero se realiza la descomposición de los carbonatos a elevada temperatura de acuerdo con las siguientes reacciones:



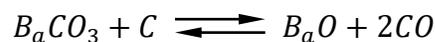
Luego, el CO_2 producido reacciona con el carbono y produce monóxido de carbono:



Finalmente, el monóxido de carbono se descompone en la superficie del acero dando dióxido de carbono y carbono naciente que pasa al acero tal como se presenta en la reacción siguiente:



No obstante, en la actualidad, cada día es más admitida otra hipótesis en cierto modo similar a la anterior, pero que no señala la formación de CO_2 y atribuye principalmente la acción activadora de los carbonatos a la reacción que se produce a alta temperatura con el carbono, formándose monóxido de carbono de acuerdo con las reacciones:



Luego, el CO producido es el que al descomponerse da lugar al carbono naciente, que es el que produce la carburación. Los óxidos como BaO y Na₂O que se producen en esas reacciones tienden luego a reaccionar con el CO_2 producido en la descomposición de CO, obteniéndose así los carbonatos correspondientes y con ellos se realiza la generación de los carbonatos que no se consumen, sino que al ser elementos productores de CO actúan como activadores del proceso de carburación. La presencia de estos óxidos tiende, por

lo tanto, a bajar el contenido en CO₂ de los gases y a aumentar el porcentaje de CO, favoreciéndose con todo ello la cementación [12].

Durante la cementación con carburante sólido la composición de la atmósfera gaseosa, que se encuentra en la caja, cambia prácticamente conforme a la línea de equilibrio como se representa en la Fig. 1.16 [13].

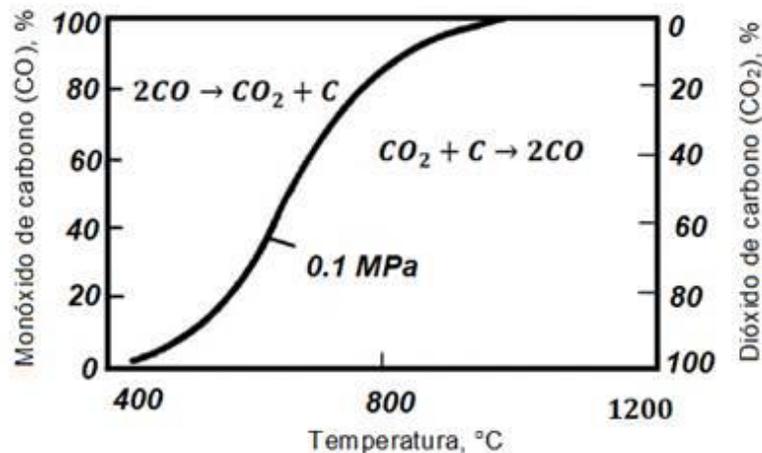


Fig. 1.16. Diagrama de equilibrio para la reacción $2CO \rightleftharpoons CO_2 + C$.

En la tecnología de cementación con carburante sólido, las piezas sometidas a cementación, después de una limpieza preliminar se colocan en cajas de acero o de hierro colado. El carburante se utiliza del modo más eficiente si el volumen ocupado por las piezas es el 30 o 35% de la cabida de la caja como se presenta en la Fig. 1.17. No obstante semejante empaque es poco realizable. Las piezas suelen ocupar un 15 a 20% de la capacidad de la caja. El volumen ocupado por las piezas y por consiguiente el gasto del carburante depende del carácter de las piezas a tratar. La dependencia entre norma de consumo del carburante y el carácter de la pieza se puede determinar según los diagramas presentados en las Figs. 1.18 y 1.19. La caja se cierra con una tapa, cuyos bordes se recubren con arcilla refractaria o con una mezcla de arcilla y arena de río. A continuación, la caja se coloca en un horno. La durabilidad de las cajas de acero soldadas es de 150 a 200 h [13].

El tiempo de calentamiento hasta la temperatura de cementación (910 a 930 °C) es de 7 a 9 min por cada centímetro de la dimensión mínima de la caja. En la Fig. 1.20 se presenta el espesor de la capa cementada en función del tiempo que dura la saturación de 920 a 930 °C. La duración de la cementación también depende de las dimensiones de la caja [13].

Los principales inconvenientes de la cementación sólida son: 1) la gran duración de la operación; 2) elevado consumo de carbón; 3) necesidad de mucha mano de obra; 4) dificultad de templar las piezas directamente; y 5) irregularidad de temperaturas en las cajas de cementación [12].

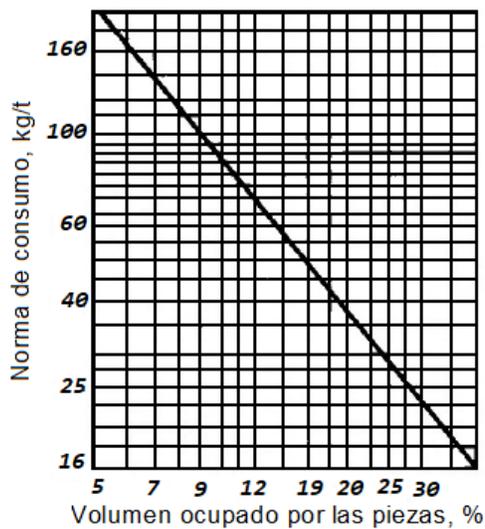


Fig. 1.17. Dependencia de la norma de consumo del carburante vegetal, respecto al volumen ocupado por la pieza en la caja de cementación.

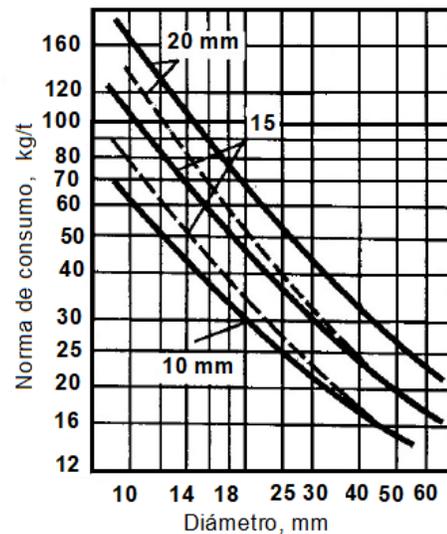


Fig. 1.18. Consumo del carburante en función del diámetro o lado del cuadrado de las piezas de la barra sólida. Las líneas llenas corresponden a las piezas de sección redonda y las de trazos a las de sección cuadrada. Los valores designan el espaciamiento entre las piezas y la caja.

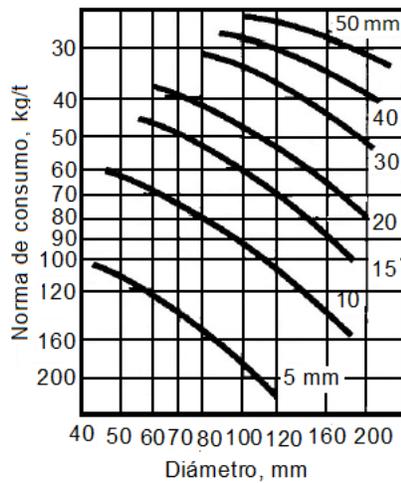


Fig. 1.19. Norma de consumo del carburante en función del diámetro exterior de las piezas cilíndricas huecas. Las cifras que marcan las curvas corresponden a los espesores de pared de las piezas.

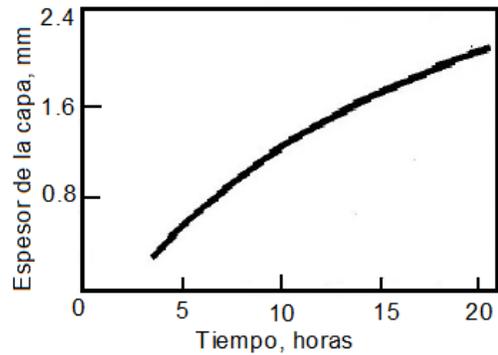


Fig. 1.20. Espesor de la capa cementada en función del tiempo que dura la saturación en el proceso de cementación con carburante sólido a 930 °C en condiciones de producción.

1.2.2 CEMENTACIÓN LÍQUIDA

En los últimos años se ha generalizado extraordinariamente el uso de baños de sales para el endurecimiento superficial de los aceros. Para espesores pequeños el proceso es mucho más rápido que la cementación con mezclas carburantes sólidos, y también es más sencilla, empleándose cada día con más éxito en competencia con los cementantes sólidos, en especial cuando se trata de pequeñas instalaciones [12].

Es frecuente realizar la cementación con sales para obtener capas duras de 0.5 a 2 mm de espesor. Esta cementación se consigue empleando baños de cianuro activos con agentes catalizadores. Esos baños se preparan con sales inertes con el cloruro y carbonato sódico, estos elementos activos como el Cianuro de sodio, cianuro cálcico o cianuro potásico y catalizadores como los cloruros y fluoruros de bario, calcio, entre otros, que sirven para incrementar la profundidad de penetración del carbono [12].

Los procesos de endurecimiento empleando sales preparadas con cianuros, puede dividirse en dos grupos: la cianuración y la cementación o carburación, aunque semejantes en algunos aspectos pueden, sin embargo, considerarse como tratamientos diferentes [12].

La cementación con sales tiene la ventaja que de las instalaciones son sencillas y relativamente baratas. El precio de un horno de sales suele ser menor que el de cualquier otro tipo de horno. Para grandes series el costo de la cementación con sales es más elevado que la cementación gaseosa.

Las sales tienen el inconveniente de ser muy venenosas por vía bucal y aunque los humos que se desprenden no lo son, sin embargo, causan molestias e irritan las vías respiratorias [12].

En el proceso de cementación en baño de sales, la gran dureza superficial que adquiere el acero puede considerarse debida principalmente a la acción del carbono. La influencia del pequeño porcentaje de nitrógeno existe en la capa periférica es muy pequeña y puede ser despreciada [12].

Los baños de sales que se utilizan en este procedimiento se preparan generalmente a base de los cianuros sódicos, con porcentajes variables de cloruro y carbonato sódico a los que se añaden uno o más cloruros o fluoruros de sodio, bario, potasio, calcio o estroncio, que actúan como activadores del proceso, aumentando notablemente la penetración del carbono, y con ello la profundidad de la capa dura que puede variar desde 0.20 a 0.30 mm [12].

Experimentalmente se ha comprobado que en la cementación con sales la presencia de cloruros alcalinotérreos dificulta la penetración del nitrógeno y favorece en cambio la penetración del carbono. Además, con las sales que contienen cloruros alcalinotérreos se puede operar a temperaturas más elevadas.

Las sales que se utilizan para la cementación de los aceros se pueden clasificar en dos grupos principales, de acuerdo con la penetración que con ellas se consigue. Unas con 17 a 23% de cianuro, con alto porcentaje de Cloruro de sodio y bajo porcentaje de cloruro de bario, que se emplean a temperaturas variables de 850 a 925 °C y se emplean para obtener capas de espesor medio de 0.2 a 1.5 mm de profundidad; y otras de 7.5 a 12 % de cianuro con alto

porcentaje de cloruro de bario y con bajo porcentaje de cloruro de sodio, que se usan cuando se desean obtener espesores variables de 1 a 3 mm y se emplean a temperaturas de 875 a 950 °C. También, existen otras sales con 25 % de Cianuro de sodio y 70 % de cloruro cálcico, que, aunque de uso bastante frecuente son, sin embargo, menos conocidas que las otras dos que se han citado [12].

En la Tabla 1.1 se presentan las composiciones de las sales de uso más corriente. El proceso de trabajo que se suele seguir en los talleres de tratamientos térmicos para mantener los baños con las composiciones adecuadas varía según la clase de sales empleadas. El fin que se persigue siempre es mantener el baño durante toda la operación dentro de unos límites de composición que en la mayoría de los casos son los citados en la Tabla 1.1.

Para conseguir lo anterior, los fabricantes suelen prepara varios tipos de sales que mezcladas en proporciones convenientes dan esas composiciones. Como con el uso suele disminuir el porcentaje de cianuro y se alteran también los porcentajes de otros elementos, es necesario añadir periódicamente ciertas sales para mantener una composición conveniente [12].

Tabla 1.1 Composición de las sales empleadas para la cementación de los aceros.

Carburante	Capa cementada	
	0.2 a 1.5 mm	1 a 3 mm
Cianuro de sodio	17 - 23%	7.5 - 12%
Cloruro de Bario	14 - 40%	45 - 55%
Otras sales alcalinas	0 - 3.5%	2 -10%
Cloruro de potasio	- - -	5.5 – 10%
Cloruro de sodio	20 - 30%	0 – 15%
Carbonato sódico	<30%	<30%
Cianato sódico	<1%	<0.30%

Según los casos se suelen usar:

- 1) Una sola sal, a base de cianuro y cloruro cálcico con algo de Cianuro de sodio que contiene todos los elementos necesarios para cementar el acero y que a medida se va gastando el baño sirve también para relleno. Esta sal suele

contener 25 % de CNNa, 70 % Cl_2Ca y 0.5-5 % de $(CN)_2Ca$, la cual es muy barata, pero es higroscópica y es necesario lavar muy bien las piezas para evitar su corrosión. No es necesario hacer análisis del baño y observando el aspecto de su superficie se conoce su grado de actividad.

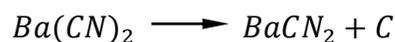
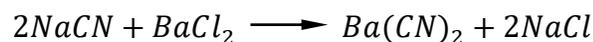
- 2) Dos sales, una de las cuales suele ser una sal neutral o una mezcla de sales neutras, constituida generalmente por cloruro y carbonato sódico y la otra una sal de cianuro con cloruros activadores (30 % de CNNa, 50 % de Cl_2Ba y 20 % de CNa).
- 3) Tres sales, una de bajo punto de fusión neutra, compuesta generalmente por cloruro o carbonato sódico que sirve para iniciar la fusión de una pequeña parte del baño de sales. Otra sal de cianuro con 80 a 90 % de cianuro de sodio y 5 a 10 % de carbonato sódico y la tercera que es la sal catalizadora con 70 a 85 % de cloruro de bario; 5 a 10 % de Cianuro de sodio, 10 % de Cloruro de sodio y 10 % de carbonato sódico, aproximadamente [12].

En los dos últimos casos durante el trabajo se añaden periódicamente pequeñas cantidades de las sales de elevado contenido en cianuro para que el contenido de este sea el adecuado.

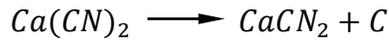
Las profundidades que se consiguen empleando sales de media y gran penetración se presenta en las Figs. 1.21 y 1.22.

La superficie de los baños de cementar se debe de cubrir siempre con escamas de grafito para evitar una pérdida exagerada de cianuro por oxidación.

La actividad de carburación del cloruro de bario en las sales de cementar es debida principalmente a las siguientes reacciones:



En las que C representa el carbono naciente que pasa al acero. En las sales que se emplean el cianuro cálcico en vez de cianuro de sodio, la principal reacción es la siguiente:



Aunque algo de nitrógeno naciente se libera en la práctica el fenómeno de liberación de carbono es mucho más importante [1].

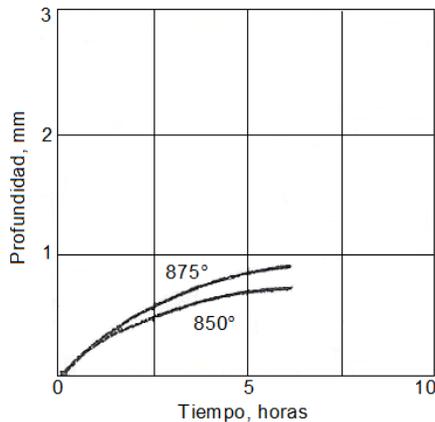


Fig. 1.21. Profundidad de la capa cementada con más de 0.30% de carbono en función de la temperatura y del tiempo en un acero de 0.10% de carbono cementado con sales de penetración media (20 % de CNNa).

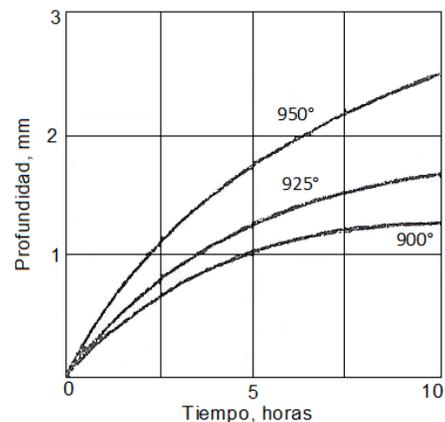


Fig. 1.22. Profundidad de la capa cementada con más de 0.30 % de carbono en función de la temperatura y del tiempo, en un acero de 0.10 % de carbono cementado con sales de gran penetración (10 % de CNNa).

La intensidad de estas reacciones se acentúa con la temperatura y con ella aumenta la liberación de carbono activo y disminuye la formación de nitrógeno, cuya influencia es perjudicial en este tratamiento por que dificulta la penetración del carbono en el acero. Como el porcentaje de cianato en el baño es un índice de la cantidad de nitrógeno que absorbe el acero, para asegurar una buena penetración de carbono se debe evitar que pase de ciertos límites, debiendo mantenerse en los baños de penetración media, un contenido de cianato inferiores a 1% y en los de gran penetración menores que 0.30% [12].

Las irregularidades que se pueden presentar en estos procesos se deben atribuir a alguna de las circunstancias siguientes:

- 1) Contenido insuficiente de cianuro para generar el carbono activo,

- 2) Aumento exagerado del contenido de carbonato sódico,
- 3) Cantidad excesiva del cianato sódico,
- 4) Bajo contenido del cloruro de bario, y
- 5) Error en la temperatura de cementación.

1.2.3 CEMENTACIÓN GASEOSA

En este proceso, manteniendo las piezas de 1 a 8 h en una atmósfera carburante, a temperaturas de 850 a 950 °C, se obtienen capas cementadas de 0.2 a 1.5 mm de profundidad. Únicamente en casos especiales, como la fabricación de blindajes, se emplean procesos más largos y se obtienen capas cementadas de mayor espesor. Aunque las instalaciones son bastante complicadas y costosas, la cementación de las piezas es muy sencilla y rápida. Se obtienen resultados muy regulares y se pueden cementar grandes cantidades de piezas en muy poco tiempo. El empleo de este procedimiento, que está sustituyendo en muchos casos a la cementación en cajas y a la cementación en sales, es de gran interés para las empresas que deban cementar muchas piezas y en cambio no es muy recomendable para talleres pequeños que trabajan sólo con pequeñas series. En la actualidad la cementación gaseosa es el método de endurecimiento superficial más empleado en grandes talleres, fábricas de automóviles, motocicletas, entre otros, donde se preparan cantidades muy importantes de piezas cementadas [12].

La cementación con gas posee algunas ventajas en comparación con la cementación con carburante sólido. En caso de cementación con gas se puede obtener una concentración prefijada de carbono en la capa; se acorta la duración del proceso puesto que no existe necesidad de calentar las cajas llenas de carburante de poca conductibilidad térmica; se garantiza la posibilidad de mecanizar y automatizar por completo los procesos y se simplifica el posterior tratamiento térmico de las piezas, ya que se puede efectuar el temple directamente después de la cementación en el horno [13].

Habiendo estudiado el papel tan importante que desempeña el monóxido de carbono en la cementación con carburantes sólidas, parece que bastaría colocar las piezas en presencia de ese gas a alta temperatura para conseguir su cementación. Sin embargo, la práctica ha demostrado que de esta forma no se consiguen buenos resultados y que, para obtener capas cementadas de composición y espesor conveniente, es necesaria la presencia de hidrocarburos en las atmósferas carburantes. Así, se ha comprobado experimentalmente que el monóxido de carbono a la elevada temperatura que se emplea en la cementación y en las condiciones en que generalmente se suele encontrar en los hornos, es muy estable y poco activo, y en cambio si se le añaden hidrocarburos, éstos se disocian fácilmente dando carbono naciente que pasa al acero, siendo en este último caso la cementación mucho más intensa [12].

El gas natural o el gas del alumbrado no puede ser empleado como gases cementantes porque se obtienen resultados bastantes irregulares, debido por una parte a las variaciones de composición de esos gases, y por otra parte empleando esos gases se suele formar un depósito de hollín sobre las piezas que dificulta la penetración del carbono. En la actualidad esos gases son muy poco utilizados como cementantes gaseosos, aunque se emplean mucho para la preparación de atmósferas carburantes como se explicará a continuación [12].

Los mejores resultados se obtienen empleando hidrocarburos diluidos en otros gases, constituidos principalmente por monóxido de carbono, nitrógeno, hidrógeno, entre otros las atmósferas carburantes se preparan generalmente empleando un gas portador o de relleno y gas o vapor activo o carburante. Como gas de relleno se suele utilizar generalmente un gas combustible casi totalmente quemado para eliminar mercaptanos, tioles, hidrocarburos etilénicos, entre otros, que son perjudiciales y que se eliminan en torres de absorción. Luego este gas se regenera (aumentando el porcentaje de CO y de H₂) al ponerlo en contacto con un catalizador de níquel. Este tipo de gas suele recibir el nombre de gas endotérmico [12].

En América se suelen emplear para la preparación de las atmósferas carburantes el gas natural y el gas de alumbrado, y en Europa gas de alumbrado y gas gasógeno [12].

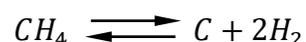
Una composición normal de gas portador es la siguiente: 20 % de CO, 39 % de H₂, 0.25 % de H₂O, 0.70 % de CH₄ y 40 % de N₂.

Como gas carburante activo se suele utilizar el metano y también se suelen emplear el butano, propano, entre otros, con buenos resultados.

La incorporación del metano al gas portador se suele hacer haciéndolo llegar directamente, en forma gaseosa desde botellas o depósitos en los que se suele almacenar. Cuando se parte del propano, butano, entre otros, que también suelen estar almacenados a presión en botellas, se les hace pasar por una cámara a elevada temperatura, donde en presencia de un catalizador (de níquel, carbón, platino, entre otros) se disocian y transforman en metano. La mezcla gaseosa disociada, compuesta principalmente por metano, hidrógeno y óxido de carbono, es la que al ser incorporada al gas portador introduce el metano en la atmósfera carburante. Por el contrario, la adición al gas portador de hidrocarburos sin disociar o aceites en estado líquido se tiene que estudiar ya que su uso directo no es recomendable porque existe la de una gran cantidad de hollín sobre las piezas [12].

Sin embargo, muy recientemente se ha comenzado a obtener resultados excelentes carburando por goteo en horno de mufla o cámara cerrada donde se inyectan cantidades muy precisas de ciertos hidrocarburos debidamente tratados, debiendo tenerse siempre la precaución de emplear hidrocarburos y alcoholes de composición muy definida. Se suelen emplear indistintamente con o sin gas portador [12].

La reacción principal en la cementación gaseosa es la siguiente:



Siendo el carbono naciente el que, al ponerse en contacto con el acero a elevada temperatura, se disuelve en el hierro gamma.

La utilización del gas portador en la cementación gaseosa, es muy interesante por ser más económico el uso de un gas portador barato que rellena fácilmente la cámara del horno, al que se añade una pequeña cantidad de hidrocarburos. El uso del gas de relleno al entrar en la atmósfera del horno en proporción adecuada, sirve para diluir el hidrocarburo que se introduce en el horno y evita la formación del hollín que a veces se presenta cuando la cementación no se hace con las debidas precauciones. De esta forma, además, se consigue un gran potencial de cementación, empleando sólo cantidades muy pequeñas de metano [12].

Además, el gas portador desplaza al aire o gases que pueden existir en las cámaras de los hornos y asegura una cierta presión en su interior. Los gases portadores constituidos por elementos o cuerpos inertes como el nitrógeno no dan buenos resultados, ya que conviene que tengan siempre ciertos porcentajes de CO y de H₂ para que la eficiencia del gas carburante sea máxima y no se gaste parte del metano en reaccionar con los elementos perjudiciales como el oxígeno, vapor de agua y dióxido de carbono, que siempre existen en mayor o menor cantidad en las atmósferas de los hornos [12].

El proceso más adecuado para la carburación de piezas de acero, es la cementación en atmósferas controladas, que permite realizar una regulación automática ininterrumpida del proceso. La preparación de atmósferas controladas se basa en la conversión catalítica de hidrocarburos gaseosos o bien con el aire (atmósfera de gas endotérmico), o bien con los productos de combustión (atmósferas de gases exotérmicos y endotérmicos). En mayor medida se utiliza la atmósfera endotérmica con regulación automática del potencial de carbono. Esto permite obtener después de la cementación la concentración indicada de carbono en el espesor de la capa, lo cual es necesario para obtener las óptimas características mecánicas [13].

1.2.4 TRATAMIENTOS TÉRMICOS POSTERIORES

Los aceros se carburizan en la región de austenita, así el temple directo desde la temperatura de carburización endurecerá sólo la parte externa si la rapidez de enfriamiento es mayor que la rapidez crítica de enfriamiento. El temple directo de los aceros de grano grueso suele dar lugar a fragilidad y distorsión, de manera que este tratamiento sólo se debe aplicar a aceros de grano fino. Los aceros aleados rara vez se utilizan en condición sólo de temple sin tratamiento térmico de revenido, debido a la gran cantidad de austenita retenida en la parte superficial endurecida. En la Fig. 1.23 se presenta varios tratamientos térmicos posteriores a la cementación para diferentes aceros de bajo carbono [1].

Cuando una pieza carburizada se endurece, la parte exterior aparecerá como una zona de martensita clara, seguida por una zona más oscura de transición [1].

La parte exterior dura o efectiva se mide desde la orilla exterior hasta la media de la zona oscura. De la naturaleza del gradiente del carbono, la parte superficial dura contiene la porción de la parte superficial superior al 0.40% de carbono y es aproximadamente igual a dos terceras partes de la superficie endurecida total [1].

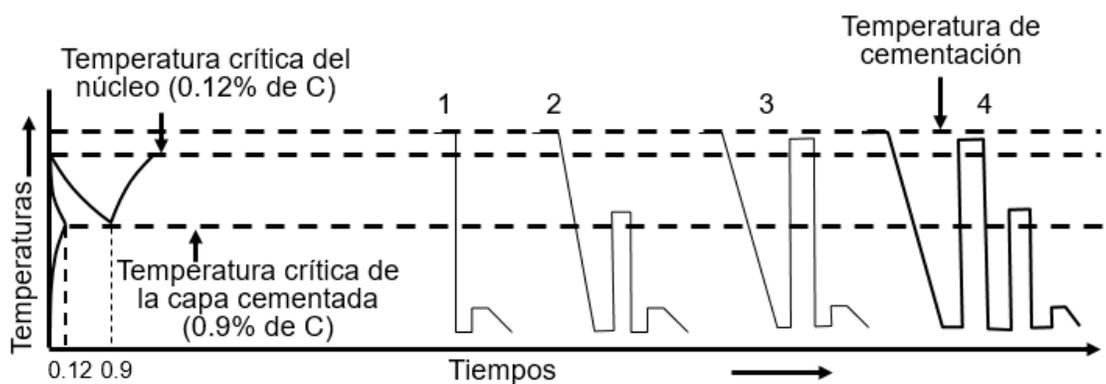


Fig. 1.23. Tratamientos térmicos posteriores a la cementación.

- 1) Temple directo y revenido a baja temperatura: Aceros de baja aleación donde la capa cementada no tiene gran cantidad de austenita retenida. Piezas con

poca responsabilidad (núcleo con poca tenacidad). Espesores de 0.2 a 0.6 mm.

- 2) Enfriamiento lento, templado y revenido a baja temperaturas: Aceros de alta aleación de grano fino. Poco peligro de deformación. Hornos de atmósfera controlada.
- 3) Enfriamiento lento, temple a temperatura ligeramente superior a A_{c3} y revenido a baja temperaturas: Aceros de media aleación y grano fino. Máxima resistencia en el núcleo (industria aeronáutica y aeroespacial). El núcleo se regenera sin permanecer durante mucho tiempo a alta temperatura. La periferia puede que quede con grano grueso y sea frágil. La dureza puede que sea un poco baja por la gran cantidad de austenita retenida.
- 4) Enfriamiento lento, primer temple a temperatura ligeramente superior a A_{c3} , segundo temple a temperatura ligeramente superior a A_{c1} y revenido a baja temperaturas. Debido a que el acero se carburiza en la región de austenita, el templado directo desde la temperatura de carburización endurecerá tanto la parte externa como la interna si la rapidez de enfriamiento es mayor que la rapidez crítica de enfriamiento. El templado directo de los aceros de grano grueso suele dar lugar a la fragilidad y distorsión, de manera que este tratamiento sólo debe aplicarse al acero de grano fino. Los aceros aleados rara vez se utilizan en la condición de templado sin tratamiento térmico ulterior, debido a la gran cantidad de austenita retenida en la parte superficial endurecida.

1.3 ESTUDIOS DE DESGASTE EN ACERO AISI 1020

El desgaste de los materiales ha sido un fenómeno que se ha evidenciado por siempre, por lo que se ha buscado combatirlo y prevenirlo de muchas maneras, una de las formas de evitar que se presente es la determinación de las características mecánicas del material (resistencia al desgaste, resistencia mecánica, resistencia a la fricción, entre otros) y su comportamiento en el

momento en que entra en contacto con otro, esto debido a que no sólo basta con que un material cumpla con los requerimientos de resistencia, sino que pueda cumplir con su función durante un periodo de tiempo razonable [14].

El tiempo de vida útil y confiabilidad de los productos manufacturados están íntimamente relacionados con sus propiedades tribológicas (resistencia a la fricción y al desgaste) del par o pares mecánicos que están en contacto y su movimiento relativo, por lo cual el sistema debe ser diseñado de tal forma que se pueda obtener un alto rendimiento. Por eso se recurre a la importancia de estudiar el acero AISI 1020 ya que es un acero muy comercial y de bajo contenido de carbono, fácil de maquinar y buena solubilidad por lo cual lo hace ideal para ser tratado térmicamente y mejorar sus propiedades dependiendo de la aplicación que se le valla a proporcionar, en la industria este acero está presente en aplicaciones como bases de matrices, soportes, engranajes, pernos de anclaje, ejes, cadenas, bujes, tornillería corriente y pasadores de baja resistencia [14].

1.3.1 EVALUACIÓN DEL DESGASTE ADHESIVO DEL ACERO AISI 1020

El estudio del desgaste y de la fricción, constituyen unos de los últimos aspectos de la mecánica clásica que presentan interrogantes que no se han solucionado. Bajo la óptica de la ingeniería, su importancia está en aumento en función de las cargas impuestas a los componentes mecánicos y la disminución constante de las tolerancias permitidas en los procesos de fabricación que generan grandes desafíos para la tribología. Así, en el presente trabajo se evalúa el comportamiento del acero AISI 1020 cuando es sometido a desgaste adhesivo [14].

En la norma de la ASTM designación G 83 se estandariza el ensayo de desgaste con una máquina de cilindros cruzados. El ensayo consiste en realizar una prueba de laboratorio para determinar el desgaste por fricción de dos

materiales. El ensayo puede realizarse para materiales iguales o diferentes, cuando el par tribológico está conformado por el mismo material (materiales iguales) los resultados de la prueba serán reportados como el volumen total perdido por el par tribológico, así como el volumen perdido por cada componente del par [14].

Con el fin de obtener las curvas de desgaste del par analizado, se deben realizar, durante el desarrollo de la prueba, varias mediciones del acumulado del material perdido, para esto se deben definir los intervalos de tiempo en los que se han de realizar dichas tomas de datos [14].

Se determinó, de acuerdo a las características del acero AISI 1020, las variables a utilizar para el ensayo a cuáles corresponden a una fuerza aplicada de 71.2 N, 10000 revoluciones y una velocidad de 100 rpm especificadas en la norma de la ASTM designación G 83-96, para la realización del ensayo de desgaste en un tribómetro de cilindros cruzados se fabricaron las probetas con las dimensiones de diámetro de 12.7 mm, longitud de 100 mm y rugosidad máxima de 0.34 μm [14].

Antes y después de realizar los ensayos se procedió a la toma de los pesos de cada una de las probetas que conforman el par tribológico. El coeficiente de fricción para el acero AISI 1020 se determinó mediante el uso de la siguiente ecuación [14].

$$V = K(FL/H) \quad (1.16)$$

donde:

K es el coeficiente de fricción,

F es la fuerza normal,

L es la longitud de deslizamiento,

H corresponde a la dureza del material, y

V es el volumen total desgastado.

En la Fig. 1.24a se presenta los resultados de las curvas de desgaste vs tiempo para el acero AISI 1020, por su baja resistencia al desgaste la primera y

segunda fase en la curva desgaste vs tiempo son de muy corta duración, así se evidencio sólo la tercera fase corresponde a desgaste acelerado, mientras que en la Fig. 1.24b se presenta la curva coeficiente de fricción vs tiempo, en donde se observa la presencia de los dos primeros estados de evolución del coeficiente de desgaste (fricción), el primero de ellos que depende de los contaminantes presentes y de la preparación de las superficies y el segundo en el que se alcanzan los valores máximos debido al desgaste ocasionado por el contacto metal-metal [14].

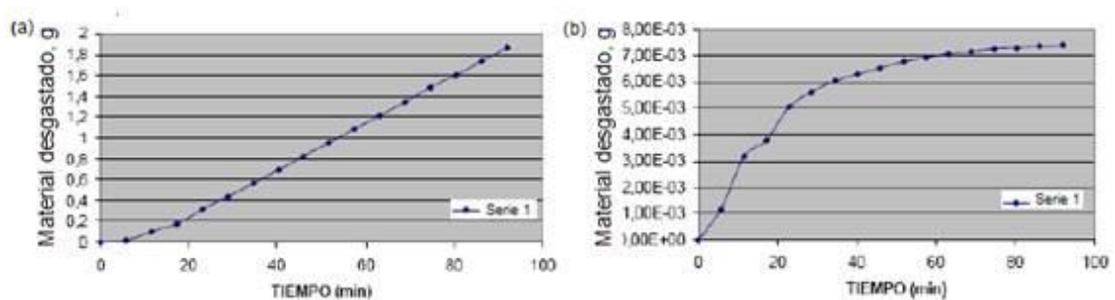


Fig. 1.24. Gráficas de desgaste de acero AISI 1020: (a) curva de desgaste vs tiempo; y (b) curva de coeficiente de fricción vs tiempo [14].

Se determinó el coeficiente de desgaste para el acero AISI 1020, encontrándose este coeficiente experimental dentro de los parámetros establecidos en la literatura, el primer estado de evolución del coeficiente de fricción (desgaste) depende de las características superficiales que presentan las probetas y de los contaminantes que contenga el material. En el segundo estado de evolución del coeficiente de desgaste se presentan los valores máximos debido a que además de los contaminantes, la calidad de la superficie se ve notoriamente disminuida por el continuo contacto metal-metal [14].

1.3.2 COMPORTAMIENTO DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN Y PÉRDIDA DE MASA, DEL ACERO 1020 EN ESTADO COMERCIAL

Los daños ocasionados por el desgaste de piezas en un equipo industrial, llevan continuamente a recambio de partes en la maquinaria, provocando tiempos de parada de la producción generalmente grandes. En realidad, al igual que la fricción, el desgaste es una respuesta integral del sistema, por lo cual, es importante entender el mecanismo que se presenta en cada caso industrial ya que existen diferentes tipos de desgaste y cada uno de ellos requiere de un análisis. La investigación realizada con la ayuda del ensayo de desgaste espiga sobre disco basándose en la norma de la ASTM designación G 99, en donde se indica que para el ensayo de desgaste se requieren dos cuerpos de ensayo que se encuentran en movimiento relativo, provocando una trayectoria de deslizamiento de forma circular sobre el disco. La primera probeta es un pin con punta redonda o plana, el cual soporta carga axial y que debe posicionarse de forma perpendicular sobre la segunda muestra, la cual es un disco circular plano que puede ser orientado horizontal o verticalmente [15].

Para obtener un resultado confiable se llevó a cabo un método experimental, en el cual se establecieron dos variables principales: tres cargas de 9.79, 21.83 y 31.62 N, tres velocidades de 60, 180 y 300 rpm, una distancia de deslizamiento de 1000 m que fue considerada constante para cada experimento. Las probetas se fabricaron en acero AISI 1020, el pin con forma cilíndrica de diámetro de 0.63 mm ($\frac{1}{4}$ pulg) y el disco de 7.62 mm (3 pulg) de diámetro. Para garantizar un acabado superficial menor que 0.8 μm en las probetas, estas fueron pulidas con una lijadora roto-orbital con discos de lija de SIC 12.70 mm (5 pulg) de diámetro y de N° 80 y N° 120. La medición del grado de rugosidad se llevó a cabo por medio de un rugosímetro Mitutoyo SJ-210, obteniendo valores de rugosidad media desde 0.2 μm hasta 0.3 μm [15].

La cantidad de ensayos realizados está dada por la combinación de las variables establecidas dando en total 9 combinaciones con 3 réplicas por cada

combinación resultante. El análisis de los resultados se llevó a cabo por medio de estadística descriptiva [15].

La masa de las espigas fue medida con una balanza de precisión de 0.0001 g, en donde se tomaron tres mediciones para el peso inicial y tres para el final en los resultados obtenidos se observa que al aumentar la velocidad durante el contacto entre la superficie de la espiga y la del disco, la pérdida de peso tiende a reducirse. De la misma forma, al mantener constante la velocidad y aumentar la carga de contacto, la pérdida de peso aumenta [15].

Los datos adquiridos del tribómetro para cada prueba fueron registrados con una frecuencia de adquisición de datos de 1 Hz. Al obtener los gráficos del comportamiento del coeficiente de fricción se utilizó la media móvil, la cual es una técnica de predicción que simplifica el análisis de tendencias suavizando las fluctuaciones que aparecen en las medidas tomadas a lo largo de un período. Los coeficientes de fricción fueron obtenidos durante ensayos considerando velocidad lineal de 0.5 m/s [15].

De la gráfica presentada en la Fig. 1.25 se observa que en los primeros 78 segundos aproximadamente de ensayo, el coeficiente de fricción aumenta hasta alcanzar un valor máximo, a partir del cual se reduce y fluctúa en una zona que involucra valores entre 0.55 y 0.78 aproximadamente. Igualmente se puede identificar que en el valor del coeficiente de fricción para el caso del acero AISI 1020 deslizando sobre acero AISI 1020 es de 0.68. Finalmente, los valores de coeficiente de fricción obtenidos durante el ensayo presentan una directa correspondencia con los valores de coeficientes de fricción reportados en la literatura, en donde para el caso de acero dúctil deslizando sobre acero dúctil en condiciones secas, reporta un valor promedio de 0.62 [15].

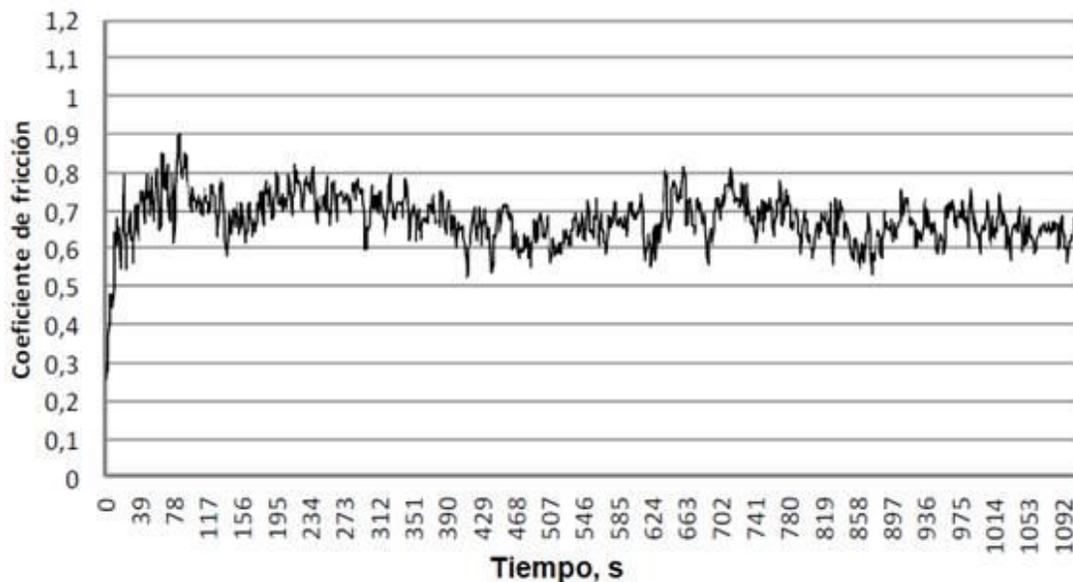


Fig. 1.25. Grafica de Coeficiente de fricción vs Tiempo de acero AISI 1020 para una carga de 998 g (9.79 N) y una velocidad de 300 rpm.

En el análisis del coeficiente de fricción y del comportamiento de la pérdida de masa en el acero AISI 1020 en estado comercial, se evidenció que el aumento en la velocidad de ensayo lleva a la reducción en la pérdida de masa y por consiguiente reducción en el desgaste del material. El aumento en la carga normal aplicada durante el contacto lleva al aumento en la pérdida de masa y por consiguiente al aumento en el desgaste del material. Al utilizar la menor carga de ensayo (9.79 N), es posible identificar que la diferencia de pesos aumenta al aumentar la velocidad, lo cual puede justificarse desde el hecho que la carga es baja para garantizar total contacto entre superficies, favoreciendo la presencia del fenómeno producido cuando la fricción estática de un cuerpo es significativamente mayor que la fricción deslizante en donde se producen micro impactos, vibración y posibles adherencias de micro partículas hacia la espiga como consecuencia del aumento en la temperatura originada por el aumento en la velocidad durante el movimiento relativo de los cuerpos [15].

1.3.3. ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO DE UN ACERO AISI 1020 TEMPLADO A UNA TEMPERATURA DE 800 °C Y REVENIDO A DIFERENTES TEMPERATURAS

El desgaste en aplicaciones industriales tales como fabricación de herramientas, maquinaria de minería, sistemas de freno, entre otros provoca pérdidas económicas y de tiempo disminuyendo la productividad y vida útil del producto que sufre este factor con lo cual se puede evidenciar la importancia de generar materiales que tengan un alto grado de resistencia a este fenómeno teniendo como resultado la reducción de los costos de operación dando así mayor rentabilidad. Al tener en cuenta estos factores se seleccionó el acero AISI 1020 como material de estudio por su gran aceptación en la industria ya que posee características como su composición química que le permite entregar un mayor desempeño en sus propiedades mecánicas, soldabilidad y maquinabilidad a diferencia de aceros del mismo grupo [16].

El objetivo de este ensayo es mostrar los resultados al someter este material a distintas pruebas que permitan diferenciar los cambios de microestructura y variaciones en la resistencia al desgaste, que se presentan al ser sometido a trabajos de alta fricción. El estudio se llevó a cabo siguiendo el procedimiento de la norma de la ASTM designación G 65 el cual tiene como objetivo determinar la pérdida de volumen de un cuerpo sólido al ser sometido a una prueba de abrasión donde el agente abrasivo es arena de sílice malla 70 cabe destacar que este material no corresponde al exigido [16].

En la norma de la ASTM designación G 65 de desgaste abrasivo se pide que para efectuar este ensayo las probetas deben poseer las siguientes dimensiones: largo de 76.2 mm, ancho de 25.4 mm y un espesor de 12.7 mm. Tomando como referencia el estado de entrega del material además se realizarán diferentes tratamientos térmicos: temple a 800 °C con un tiempo de 20 min enfriado en agua y revenido a 200, 350 y 450 °C con un tiempo de 30 min enfriados a temperatura ambiente, en total serán 5 diferentes estados que serán tomados en la investigación. Se eligió una cantidad aleatoria y experimental de

15 probetas y 5 grupos muestrales. Considerando un valor mínimo de 3 probetas por grupo con lo cual se pueden evidenciar errores de medición u observación. Las variables para dicho ensayo son una carga de 130 N, 2000 ciclos y una abrasión línea de 14036 m. Para obtener el valor de la pérdida de volumen se hizo uso de la siguiente ecuación [16].

$$Volumen\ perdido = \frac{masa\ perdida\ (g)}{densidad\ (g/cm^3)} \times 1000 \quad (1.17)$$

Los resultados indican que al realizar los diferentes tratamientos térmicos el comportamiento frente a la resistencia al desgaste abrasivo se puede mejorar luego de llevar un proceso de temple acompañado de un revenido a baja temperatura como se presenta en la Fig. 1.26a donde el comportamiento del material es gradual, a medida que aumentan las temperaturas de revenido el valor de pérdida de volumen aumenta. En la Fig. 1.26b se presenta una conducta inestable, lo cual puede ser debido a una falta de calibración del equipo de desgaste abrasivo y a la irregularidad del agente abrasivo [16].

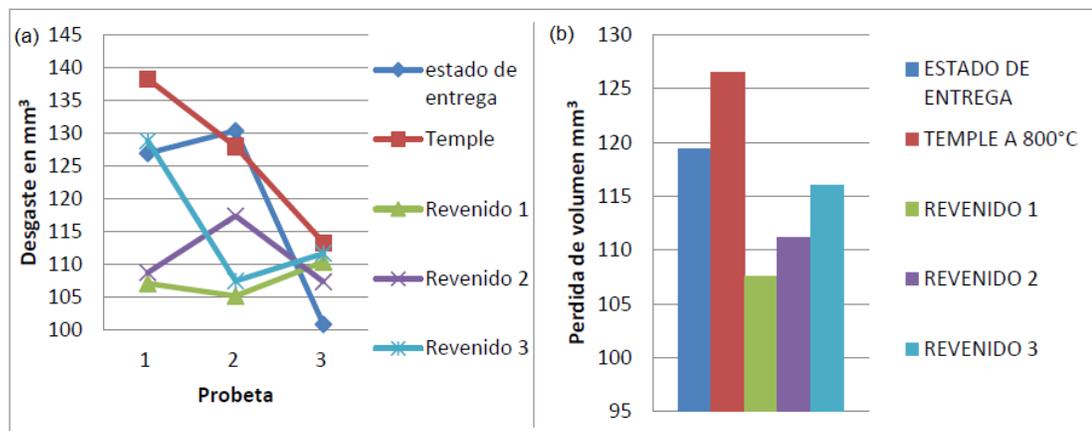


Fig. 1.26. Gráficas de desgaste de acero AISI 1020: (a) pérdida de volumen por desgaste abrasivo; (b) comparativo de resistencia al desgaste abrasivo [16].

Para la realización de las pruebas de dureza se sometieron las probetas a varias repeticiones, de las cuales se obtuvo un promedio por cada tratamiento

térmico arrojando los resultados descritos en la Tabla 1.2, lo cual indica que el estado del material con mayor dureza es el de temple y el revenido a 200 °C y que el estado con menor dureza es el de estado de entrega y revenido a 450 °C [16].

Tabla 1.2. Promedios de dureza (Vickers) [16].

Tratamiento térmico	Promedio de dureza (HV)
Estado de entrega	380.4
Temple a 800 °C	701.0
Revenido a 200 °C (R1)	464.2
Revenido a 350 °C (R2)	411.4
Revenido a 450 °C (R3)	351.8

El objetivo principal de esta investigación es conocer el comportamiento del acero AISI 1020 al ser sometido a un desgaste abrasivo, basándose bajo la norma de la ASTM designación G 65, la cual no se pudo cumplir con todos los parámetros ya que el agente abrasivo exigido por la norma no es de fácil acceso, por tanto al sustituirlo el comportamiento del desgaste es diferente al esperado; teniendo en cuenta este factor se puede inducir que los aceros de bajo y medio contenido de carbono tiene un buen comportamiento frente al desgaste abrasivo al ser tratado térmicamente de la manera que se ajuste a la aplicación en la industria [16].

1.3.3 EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE ADHESIVO DEL ACERO AISI 1020 CEMENTADO CON CARBÓN OBTENIDO A PARTIR DE LA BIOMASA DE CAFÉ

Hoy en día se necesita prologar el ciclo de vida útil de las piezas fabricadas en materiales metálicos, como en las aleaciones ferrosas (aceros). Buscando mejorar las propiedades mecánicas de este aplicando diferentes técnicas de tratamientos superficiales como lo son los termoquímicos y térmicos [17].

En esta investigación se trató la cementación del acero AISI 1020 utilizando como material cementante carboncillo obtenido de la biomasa de café, con el fin de analizar y estudiar la influencia en la resistencia al desgaste y dureza [17].

La investigación inició con la caracterización del acero en estado comercial con una dureza de 74.23 HRB, donde se realizó pruebas de macro dureza en el material. Luego se llevará cabo el corte y maquinado de cinco discos a partir de una barra cilíndrica de 76 mm de diámetro de una barra de acero 1020 en estado comercial hasta dejarlo con un peso cercano a 200 g y un espesor de 7 mm. El material cementante seleccionado para llevar a cabo el proceso de cementación fue el carbón obtenido a partir de biomasa de café. Inicialmente la borra de café fue introducida al interior de la caja cementante para después ser sometida a una temperatura de 500 °C durante un tiempo de subida de 1.5 h y un tiempo de sostenimiento de 4 h hasta la obtención del carbón. En total se realizaron 7 procesos de carbonización de biomasa a las mismas condiciones con el fin de recolectar 6 kg de agente cementante para después vaciar dentro de una caja para cementación fabricada en acero inoxidable el carbón vegetal y localizar en el interior los cinco discos maquinados y lijados previamente para realizar el proceso de cementación del material con el carboncillo como agente de activación, con un tiempo de estancia en el horno de 510 min a una temperatura de 970 °C [17].

Finalizado este proceso, se realizaron tratamientos térmicos posteriores a la cementación con tiempos de subida de 30 min y sostenimiento de 50 min los cuales fueron dos temple a 800 °C uno enfriado en agua y el otro con aceite 10W30 mobil, mientras que los dos revenidos se realizaron a 400 °C enfriados a temperatura ambiente tal como se presenta en la Tabla 1.3 [17].

Tabla 1.3. Parámetros de tratamientos térmicos aplicados a los discos de acero AISI 1020 [17].

Disco	Tratamiento térmico	Medio de enfriamiento	Temperatura máxima, °C	Tiempo de subida, min	Tiempo de sostenimiento, min
I	Acero en estado comercial	NT	NT	NT	NT
II	Cementación + temple en agua	Agua	800	30	50
III	Cementación	M. ambiente	970	90	510
IV	Cementación + temple en aceite 10W30	Aceite 10W30	800	30	50
V	Cementación + temple en agua + revenido	M. ambiente	400	30	50
VI	Cementación + temple en aceite 10W30 + revenido	M. ambiente	400	30	50

Los ensayos de desgaste se realizaron sin la presencia de lubricantes y otra sustancia influyente en el desgaste del material. En el banco espiga sobre disco, se utilizó una esfera de óxido de zirconio (ZrO_2), donde se aplicó una carga de 50 N, una velocidad lineal de 0.342 m/s durante un recorrido de 1000 m. Se realizó el mismo proceso a lo largo de la cara del disco a radios de 10, 15, 20 y 25 mm desde el centro hacia la periferia finalmente se compararon los resultados obtenidos a través de registros de dureza presentados es la Tabla 1.4 [17].

Tabla 1.4. Dureza de los discos de acero AISI 1020 con tratamiento térmico [17].

Disco	Tratamiento térmico	Dureza, HRC
II	Cementado y templado en agua	59.13
III	Cementado	28.93
IV	Cementado y templado en aceite 10W30	54.37
V	Cementado, templado en agua y revenido	51.06
VI	Cementado, templado en aceite 10W30 y revenido	45.86

El uso del carbón de borra de café como agente cementante durante el proceso de cementación sólida al acero AISI 1020 entregó resultados muy favorables al aumentar la dureza en la capa superficial con valores entre 45 - 60 HRC. La microestructura del disco cementado, templado en agua y revenido presento el mayor grosor de capa siendo de 1287.03 μm . La microestructura del disco cementado, templado en agua y revenido presento el mayor grosor de capa siendo de 1287.03 μm . Comparándolo con la capa del disco cementado de 1003.90 μm , y el cementado, templado en aceite 10W30 y revenido que es de 1113.53 μm . los resultados mostrados y analizados para cada uno de los tratamientos térmicos a los que fue sometido el acero AISI 1020 permiten observar que al cementar con carbón obtenido de la borra de café sin utilizar ningún tipo de activador y aplicando posteriormente un temple y revenido mejor las propiedades mecánicas como dureza, ductilidad y resistencia al desgaste del material. En el caso de los estudios realizados el disco IV presentó en mayor medida pérdida del material siendo de 0.00983 g [17].

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

A nivel experimental se pudo 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) [18].

El proceso experimental dio inicio con el maquinado de las probetas que se sometieron a los ensayos, las cuales son de acero AISI 1020 con dimensiones de 50 mm de diámetro y 10 mm de espesor y espigas acero AISI O1 con dimensiones de 4 mm de diámetro y 25 mm de longitud con ambas caras planas

el total de las probetas es de 36 discos y 36 espigas respectivamente, el ensayo de desgaste que se utilizó es el de espiga sobre disco [18].

El tratamiento térmico aplicado es de cementación, a 18 de los 36 discos. Se determinó que las condiciones óptimas para realizar el tratamiento termoquímico de cementación se obtienen 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 colocaron los 18 discos dentro de la caja de cementación y luego se llenó 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. La caja de cementación se ubicó exactamente al centro de la bandeja del horno, a una temperatura de 900 °C con tiempo de permanencia de la caja dentro del horno de 8 h posteriormente siendo enfriadas al aire [18].

Después de finalizar el tratamiento termoquímico de cementación se realizó un post tratamiento térmico de temple y revenido, el temple se realizó a una temperatura de 875 °C la cual corresponde a la temperatura de temple de la zona superficial rica en carbono con un tiempo de 20 min, el enfriamiento se realizó en aceite y el revenido a una temperatura de 200 °C con un tiempo de 20 min para posteriormente ser enfriada a temperatura ambiente. Las espigas de acero AISI O1 se sometieron a un tratamiento térmico de temple y revenido, el temple de las espigas se realiza a una temperatura de 800 °C con un tiempo de 2 min para posteriormente ser enfriados en aceite, el revenido se realiza a una temperatura de 200 °C con un tiempo de 12 min para posteriormente ser enfriadas al aire [18].

Los resultados de desgaste normalmente se obtuvieron realizando los ensayos para una distancia de deslizamiento, carga y velocidad seleccionada. Así, en la Tabla 1.5 se presenta 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 [18].

Tabla 1.5. Condiciones y variables bajo las que se realizan los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco [18].

Condición	Variables		
	Velocidad, m/s	Distancia de deslizamiento, m	Carga, N
Acero AISI 1020 no cementado	0.15	1000	5
			10
			15
		1500	5
			10
			15
Acero AISI 1020 cementado	0.15	1000	5
			10
			15
		1500	5
			10
			15

Para la determinación de la dureza de los especímenes cementados se tomaron 5 indentaciones en la superficie de una misma muestra, en la Tabla 1.6 se presenta los resultados de dichas mediciones [18].

Tabla 1.6. Medición de dureza Rockwell C [18].

N°	Dureza, HRC	Promedio, HRC	DE de HRC
1	53.0	47.82	3.88
2	51.0		
3	45.0		
4	45.0		
5	45.1		

En los resultados obtenidos del ensayo 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 AISI O1 que presenta una pérdida de masa casi despreciable para las condiciones de carga de 5 y 10 N [18].

Con base a los resultados obtenidos se presenta en la Fig. 1.27 la curva de desgaste en función de la distancia de deslizamiento para las 6 diferentes combinaciones de carga y condición de materiales ensayados, tal como se

plantea en la teoría, 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 [18].

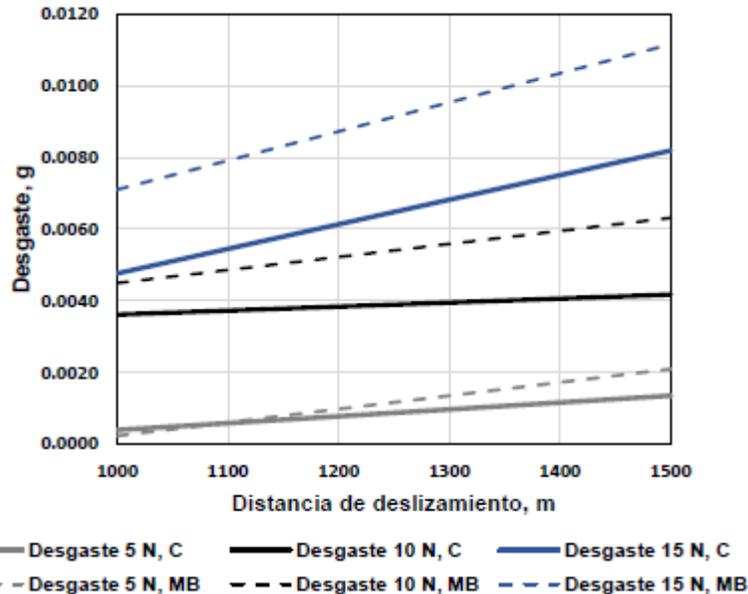


Fig. 1.27. Curvas de desgaste respecto a la distancia de deslizamiento [18].

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. 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, 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 [18].

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 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 [18].

El principal objetivo de esta investigación era la caracterización de la velocidad al desgaste de una espiga de acero para herramientas O1 sobre discos de acero AISI 1020 con y sin cementación con post tratamiento térmico de temple y revenidos a baja temperatura, pero por motivos de emergencia por la presente pandemia se vio la necesidad de tener que reestructurar el trabajo dado como resultado un nuevo enfoque hacia la investigación por lo tanto el nuevo objetivo es determinar la resistencia al desgaste entre espigas de acero AISI O1 con punta semiesférica y discos de acero AISI 1020 recocidos.

2 DISEÑO EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se describe cada una de las etapas que se deberán de realizar para el desarrollo de este estudio de desgaste tipo espiga sobre disco, dicho proceso deberá de comprender en primera instancia el maquinado de las probetas. Se contempla la fabricación de 20 discos de 50 mm de diámetro y 10 mm de espesor de acero AISI 1020 y 20 espigas de punta semiesférica de 4 mm de diámetro y longitud de 25 mm de acero AISI O1.

Se presentan las especificaciones del tratamiento térmico de recocido que se realizó en los 20 discos. Al mismo tiempo todas las espigas de acero AISI O1 son sometidas 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 la determinación de dureza en los discos cementados y la medición del espesor de la capa cementada.

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. Se inicia con el dimensionamiento de las probetas para posteriormente realizar su respectivo maquinado, luego se establecen los procesos propios de los tratamientos 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.

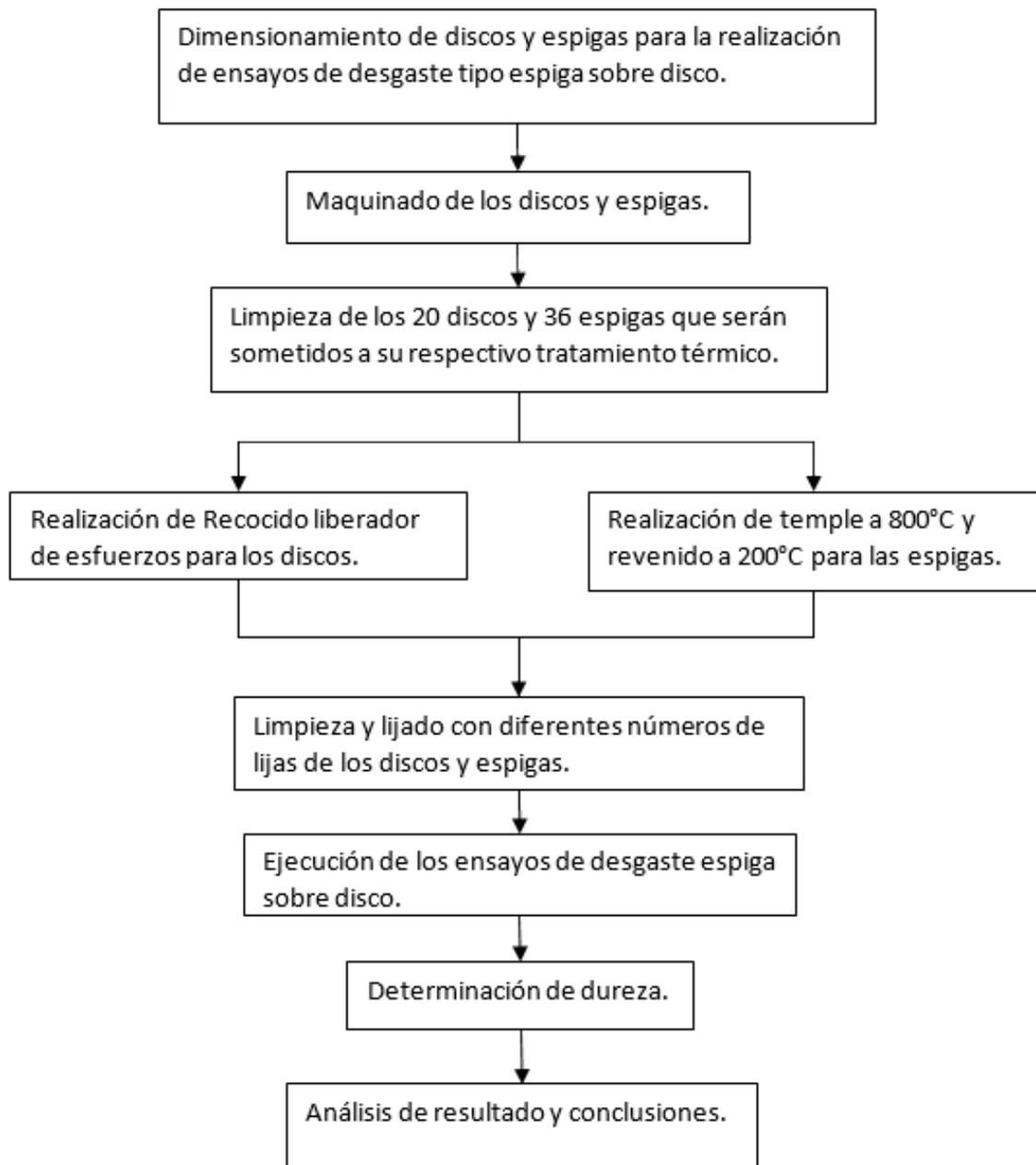


Fig. 2.1. Diagrama de flujo de la metodología experimental.

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

El dimensionamiento de las probetas se realizó tomando en consideración el manual del módulo para ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco marca GUNT, modelo TM 260.3. Dicho aparato se utilizará 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 50 mm de diámetro y 10.1 mm de espesor y cuenta en su centro con un agujero de 4.37 mm de diámetro; dicho agujero permite la sujeción del disco al vaso portador del equipo, mediante un perno, existe holgura entre el perno y el disco, por lo que no es necesario realizar un ajuste. La espiga posee 4 mm de diámetro, 25 mm de longitud y uno de los extremos es semiesférico con un radio de 2 mm.

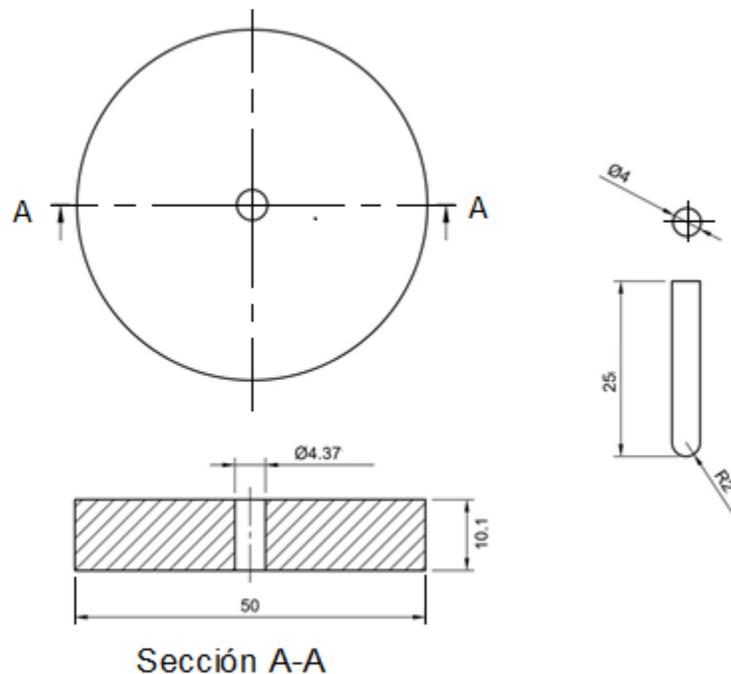


Fig. 2.2. Dimensiones de los especímenes a utilizar en el ensayo tipo espiga sobre disco. Cotas en mm.

2.3 MAQUINADO DE LAS PROBETAS

Los discos de acero AISI 1020 y las espigas de acero AISI O1 se maquinaron a partir de una barra cilíndrica de diámetro de 50.80 mm (2 pulg) y de 12.7 mm (1/2 pulg), respectivamente. 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

Elemento Aleación	% 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 los discos da inicio realizando un proceso de cilindrado para lograr obtener el diámetro de 50 mm a partir de los 50.80 mm de diámetro original de la barra. Luego se procedió a realizar un refrentado en la sección transversal de la barra con el fin de lograr una superficie uniforme como se presenta en la Fig. 2.3, se procede a perforar un agujero a través de la barra con una profundidad no mayor a 13 mm con una broca de 4.37 mm (11/64 pulg) posteriormente se realizó un corte sobredimensionado del espécimen a 12 mm de espesor finalizando con un refrentado en la cara recién cortada del disco, este proceso se repite para la creación de cada uno de los discos. Cada disco finalizado se colocó en un recipiente con aceite para protegerlos de la corrosión.

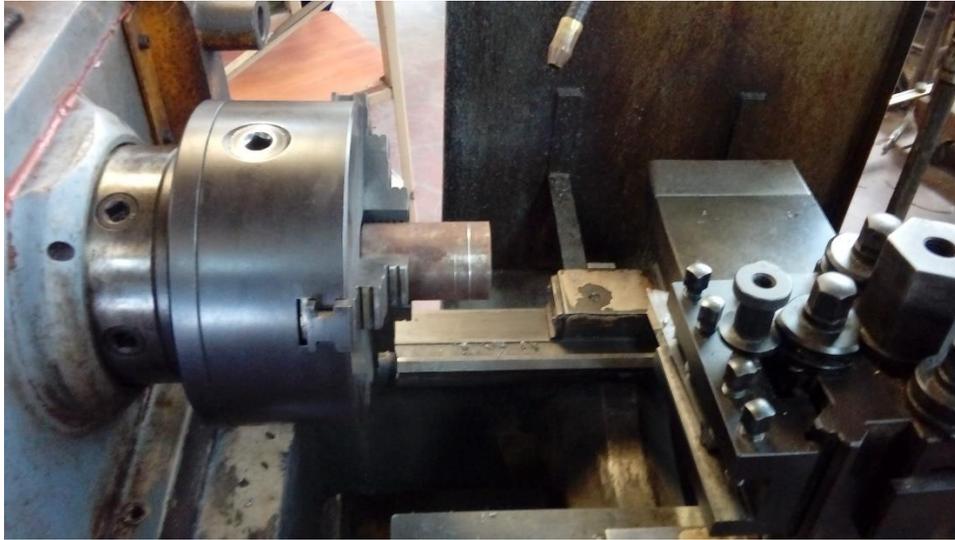


Fig. 2.3 Maquinado de los discos en un torno convencional.

2.4 TRATAMIENTO TÉRMICO DE LOS DISCOS

Al haber finalizado el maquinado de los discos se realizó un tratamiento térmico de recocido de alivio de esfuerzos llamado también recocido subcrítico a una temperatura de 550 °C, El tratamiento térmico se realizó en una atmósfera inerte de argón con el fin de evitar la oxidación de los especímenes durante el proceso.

El proceso para realizar el tratamiento térmico consiste en el montaje de la cámara de gas inerte dentro de la cámara del horno. 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, así evitar caídas de temperatura y propiciar un ambiente seguro de operación como se presenta en la Fig. 2.4.



Fig. 2.4 Cámara de gas inerte utilizada durante el tratamiento térmico de los discos.

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 introdujeron 5 discos dentro de ésta, para facilitar la extracción de los discos, por lo tanto, el tratamiento térmico se realizó en 4 grupos, con 5 discos en cada grupo.

Posterior a la colocación de los discos dentro de la cámara, esta se cierra y se sella usando silicón, con el propósito de evitar fugas y propiciar una atmósfera controlada. Posteriormente se realizó 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, el tiempo de mantenimiento a esta temperatura fue de 20 min y una vez transcurrido dicho tiempo, los discos se dejaron enfriar al aire libre.

2.5 TRATAMIENTO TÉRMICO DE LAS ESPIGAS

Las espigas de acero AISI O1 fueron sometidas a un tratamiento térmico de temple y revenido; en la Fig. 2.5 se observa la curva de temperatura – tiempo correspondiente al tratamiento térmico de las espigas.

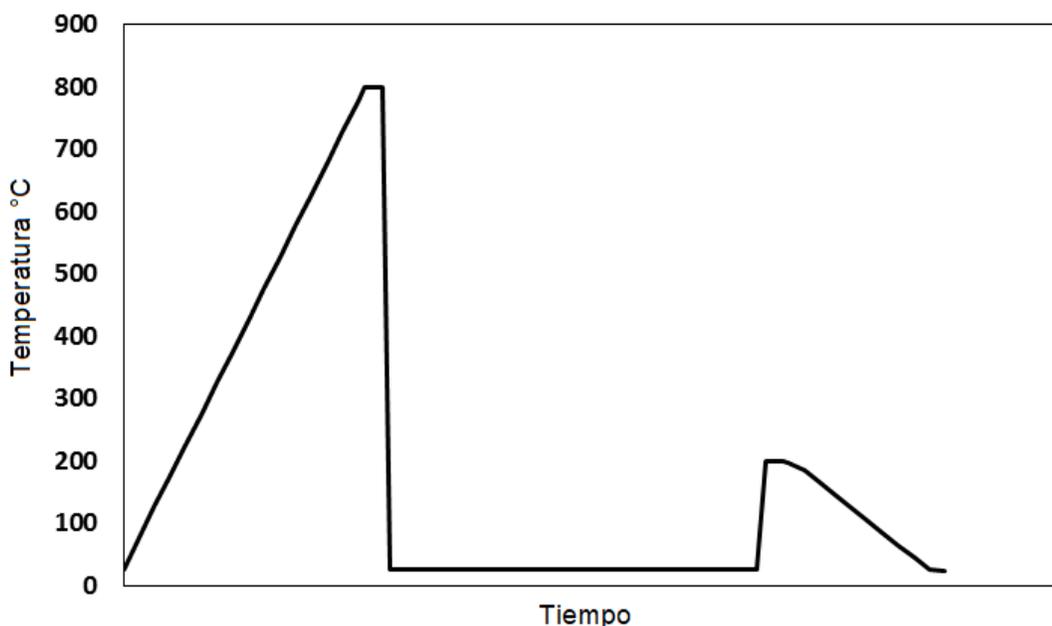


Fig. 2.5 Curva de variación temperatura-tiempo para el tratamiento térmico de temple y revenido de las espigas de acero AISI O1.

El procedimiento para realizar el tratamiento térmico de las espigas consiste en los mismos pasos que se siguieron en el tratamiento térmico de los discos, con la única diferencia que en esta ocasión se realizó el tratamiento térmico de las 20 espigas en una sola sesión, para facilitar el proceso de temple se dispondrá de 4 grupos de 5 espigas amarradas 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 4 mm el tiempo de mantenimiento a la temperatura dada es de 30 min. Luego, igual que los discos, el temple se realizó en aceite.

El proceso de revenido se realizó una vez que el horno alcanza una temperatura de 100 °C, momento en el cual se introdujeron las espigas en la cámara del horno y luego se hizo llegar a una temperatura de 200 °C. El tiempo de mantenimiento a dicha temperatura, fue de 20 min. Una vez pasado dicho tiempo las espigas se extrajeron 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.

2.6 DETERMINACIÓN DE DUREZA

Para la determinación de la dureza, se utilizó el ensayo de dureza Rockwell B, un método recomendado para la determinación de dureza de aceros al carbono. Para la realización de dicho ensayo se utilizó un durómetro marca INNOVATEST ubicado en el Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador presentado en la Fig. 2.6.

Para utilizar la escala B de dureza se aplicó una carga total de 100 kg_f y se utilizó un penetrador de bola de carburo de tungsteno de 1/8 pulg de diámetro. Así, se realizaron 5 tomas de dureza sobre diferentes puntos en la superficie de la muestra.

El proceso para obtener la dureza consiste en colocar la probeta sobre el porta muestras del durómetro, se acerca hacia el indentador sin hacer contacto con la superficie de la probeta como se observa en la Fig. 2.7, posteriormente se aplica la carga y se lee automáticamente los resultados obtenidos en la pantalla digital del durómetro



Fig. 2.6. Durómetro marca INNOVETEST.

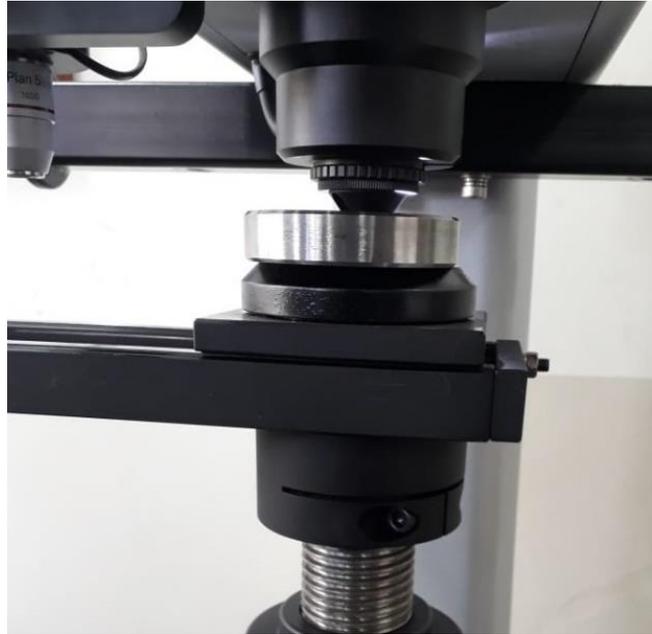


Fig. 2.7 Posicionamiento de la probeta durante la prueba de dureza.

Para obtener 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, lo cual garantiza que la medición sea más confiable. Además, la superficie debe de estar libre de óxidos, aceites o cualquier material contaminante.

2.7 PREPARACIÓN PREVIA AL ENSAYO DE DESGASTE TIPO ESPIGA SOBRE DISCO

Tanto los discos como las espigas son sometidos a un proceso previo a la ejecución del experimento, dicha preparación consiste en una limpieza del espécimen.

Para los discos el proceso de limpieza consiste en un lavado con agua y jabón líquido a modo de retirar los residuos del aceite en el que han estado guardado tras el proceso de maquinado.

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 se realizó el lijado desde una hoja basta de SiC número 180, luego se utilizan hojas menos bastas (220, 320 y 400), hasta llegar a las más finas (500, 600 y 1200).

Un proceso similar se realizó con el extremo semiesférico de las espigas que se someterá al ensayo, la diferencia radica en que, para dicha sección se utilizaran los números de lija 600 y 1200. En la Fig. 2.8 se presenta la superficie de uno de los discos tras el proceso de lijado.

Luego los especímenes se deberán secar utilizando aire caliente, para asegurar la remoción de la humedad, así dicho proceso se realizó con mayor intensidad en los discos, debido a que el acero AISI 1020 no presenta resistencia a la corrosión, a diferencia del acero AISI O1. Posteriormente, los discos se guardarán en bolsas plásticas con cierre hermético para protegerlos de la corrosión.

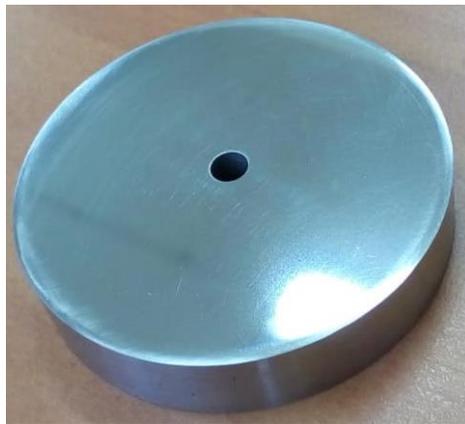


Fig. 2.8. Disco de acero AISI 1020 tras el proceso de lijado.

2.8 ENSAYO DE DESGASTE TIPO ESPIGA SOBRE DISCO

Los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco se realizaron 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 encuentran ubicados en el laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica mostrado en la Fig. 2.9.

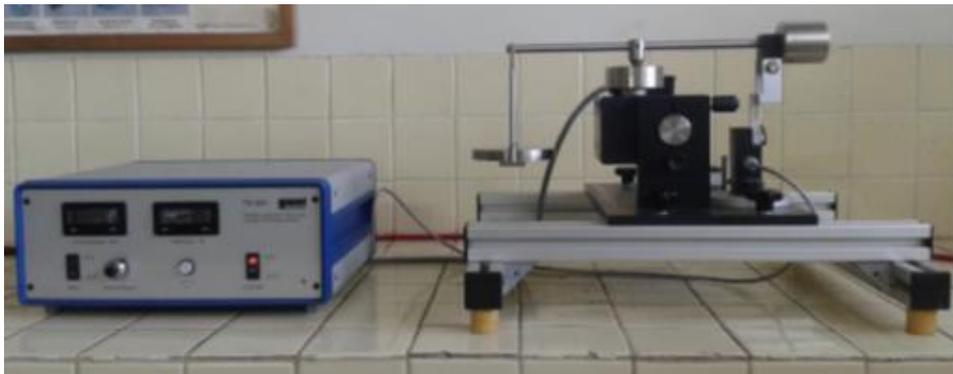


Fig. 2.9. Módulo para ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco marca GUNT, TM 260.3.

El módulo para ensayos tipo espiga sobre disco permite posicionar una espiga con una superficie de contacto 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 circular sobre la superficie del disco; para el caso de los experimentos se utilizan espigas con punta semiesférica. La espiga se coloca contra el disco y se le aplica una carga constante por medio de un brazo en el cual se aplican pesos, en la Fig. 2.10 se presenta un esquema del módulo para ensayos tipo espiga sobre disco en el que se enumeran sus componentes más importantes.

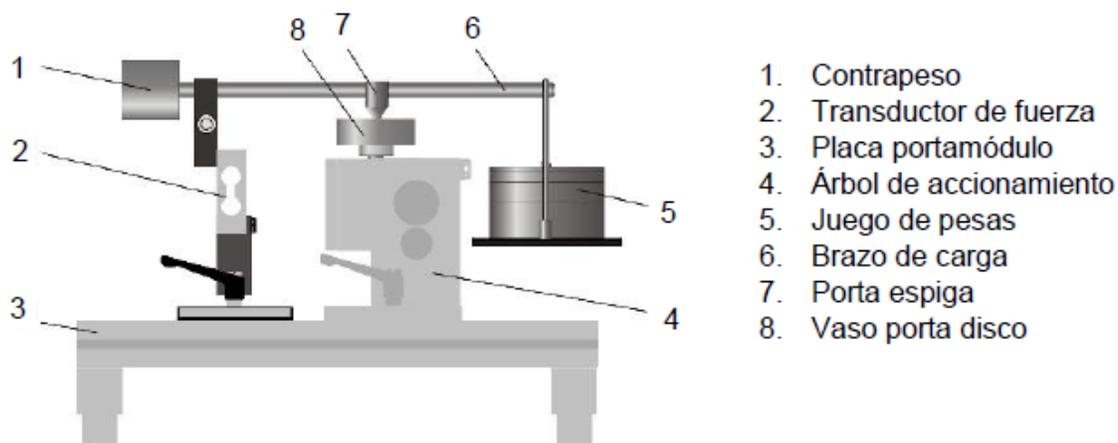


Fig. 2.10. Módulo para ensayos tipo espiga sobre disco con sus principales componentes señalados.

Los resultados de desgaste se deben reportar separadamente como la pérdida de masa en gramos para la espiga y el disco. La cantidad de desgaste deberá ser determinada pesando en una balanza analítica ubicada en el Centro de Investigaciones de Metrología de la Universidad de El Salvador, ambos especímenes antes y después de cada prueba.

Los resultados de desgaste normalmente son obtenidos realizando los ensayos para una distancia de deslizamiento, carga y velocidad seleccionada, en la Tabla 2.2 se presentan las diferentes variables del experimento, se realizarán 3 experimentos por cada una de las 12 variantes.

Tabla 2.2. 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	0.15	1000	5
			10
			15
	0.15	1500	5
			10
			15

La velocidad a la que se realizarán todos los experimentos corresponde a 0.15 m/s, 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 realizan 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 realizan dos mediciones, la del diámetro interno de la huella y la del diámetro externo, cuyos valores son 4.06 y 4.26 cm respectivamente, de ambos valores se obtiene el diámetro central de la huella de desgaste, el cual será el valor medio correspondiente a 4.16 cm. Por lo tanto, sustituyendo en Ec. 2.1 se obtiene un valor de 7.21 rad/s, convirtiéndolo a revoluciones por minuto se tiene 68.85 rpm, los cuales se aproximan a 69 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 llevó 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 es la distancia de deslizamiento en metros, y

v es la velocidad lineal de deslizamiento.

Así, debido a que la velocidad de deslizamiento es la misma para todos los experimentos (0.15 m/s) y se trabaja con dos distancias de deslizamiento diferentes, el tiempo requerido tanto para 1000 y 1500 m es de 6666.67 y 10000 s respectivamente, transformándolos a horas corresponden a 1.51 y 2.46 h, respectivamente.

Una vez establecidas las variables de tiempo y carga se procedió a realizar dichos ensayos. Se colocan tanto el disco como la espiga en sus respectivos soportes, luego se enciende la caja de mando y el motor de la misma ajustando el número de revoluciones al cual se trabajará, posteriormente se baja el brazo de carga de manera que la espiga se apoye en el disco, luego se colocan en el porta carga la combinación de pesas correspondiente a la carga bajo la que se realiza el experimento según la Tabla 2.2. Finalmente se coloca éste al brazo de carga y se lee el valor de la fuerza de fricción y se anota dicho valor, se realizaron lecturas cada cierto tiempo 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.

3 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta los resultados obtenidos mediante la realización 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, como también para los ensayos tipo espiga sobre disco, correspondientes a las diferentes combinaciones de parámetros de los ensayos. Finalizando con la realización de un análisis estadístico de los datos y su comparación entre sí.

3.1 DETERMINACIÓN DE LA DUREZA

Para la determinación de la dureza de los discos utilizados para los ensayos, se tomaron 5 mediciones en la superficie de una misma disco elegido al azar: Así en la Tabla 3.1 se presenta los resultados obtenidos de dichas mediciones.

Tabla 3.1 Medición de dureza Rockwell B.

N°	Valor HRB	Promedio HRB	DE HRB
1	87.50	90.28	1.607
2	90.50		
3	90.76		
4	91.06		
5	91.59		

El valor promedio de dureza es 90.28 HRB, con una desviación estándar de 1.607 HRB, el cual corresponde al valor reportado en la carta técnica del acero AISI 1020 con tratamiento térmico de recocido.

3.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DESGASTE

A continuación, en las Tablas 3.2 y 3.3 se presentan los resultados obtenidos en 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, el desgaste de las espigas de acero AISI O1 y las curvas del coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento.

Se procedió a determinar la masa de los discos y espigas antes y después de cada ensayo, para lo cual se utilizó una balanza analítica tal como se describió en el capítulo anterior. Para cada espécimen se realizaron 3 mediciones diferentes de masa inicial y final para obtener el promedio. En la Tabla 3.2 se presentan los valores promedio de pérdida de masa para cada disco, especificando los parámetros bajo los que se realizó el ensayo de desgaste; de la misma manera en la Tabla 3.3 se presentan los datos correspondientes a la espiga de acero AISI O1.

En las Figs. 3.1 - 3.6 se presentan las gráficas de la variación del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento correspondientes a cada condición de ensayo. Dichos resultados fueron obtenidos mediante la toma del valor de la fuerza de fricción durante la realización de cada experimento y posteriormente se procesó utilizando la Ec. 2.3.

Tabla 3.2. Valores de desgaste en los discos de acero AISI 1020.

No.	Distancia, m	Carga, N	Masa inicial, g	Masa final, g	Pérdida, g
1	1000	5	152.3166902	152.3160250	0.0006652
2			151.1878924	151.1710544	0.0168380
3			152.6797258	152.6591390	0.0205868
4		10	152.0668390	152.0306735	0.0361655
5			151.3979035	151.3394730	0.0584305
6			151.9055220	151.8961549	0.0093671
7		15	152.4538377	152.4451215	0.0087162
8			151.7018239	151.5818401	0.1199838
9			151.7038105	151.5892598	0.1145507
10	1500	5	152.1119909	152.1117011	0.0002898
11			151.8017217	151.7913379	0.0103838
12			151.8894168	151.8888725	0.0005443
13		10	151.7870401	151.6563054	0.1307347
14			151.6046093	151.5945557	0.0100536
15			150.9127587	150.8985414	0.0142173
16		15	151.1008945	150.9471231	0.1537714
17			151.8225713	151.8126698	0.1674593
18			152.1227198	151.9415726	0.1811472

Tabla 3.3 Valores de desgaste de las espigas de acero AISI O1.

No.	Distancia, m	Carga, N	Masa inicial, g	Masa final, g	Pérdida, g
1	1000	5	2.3373709	2.3370375	0.0003334
2			2.3563159	2.3559792	0.0003367
3			2.3533992	2.3524425	0.0009567
4		10	2.3280009	2.3268475	0.0011534
5			2.3454475	2.3450742	0.0003733
6			2.3470209	2.3462192	0.0008017
7		15	2.3554975	2.3539659	0.0015316
8			2.3298892	2.3294642	0.0004250
9			2.3439709	2.3436292	0.0003417
10	1500	5	2.3606492	2.3599308	0.0007184
11			2.3372925	2.3364742	0.0008183
12			2.3477825	2.3469292	0.0008533
13		10	2.3587142	2.3578642	0.0008500
14			2.3642742	2.3625159	0.0017583
15			2.3478342	2.3460526	0.0017816
16		15	2.3630592	2.3621975	0.0008617
17			2.3477975	2.3457458	0.0020517
18			2.3643225	2.3634142	0.0009083

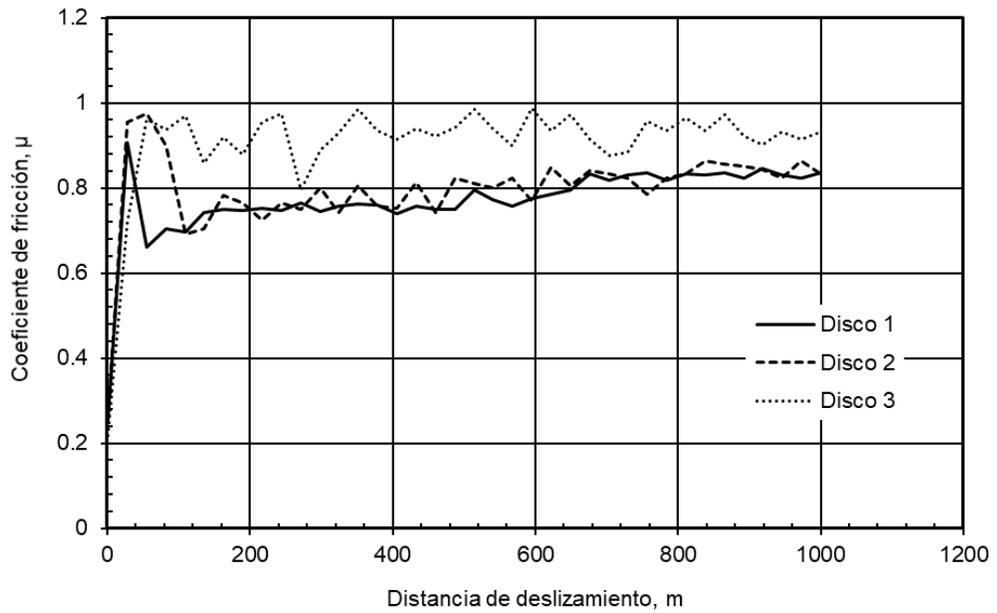


Fig. 3.1. Curvas de coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento de ensayos de desgaste de espigas de acero AISI O1 sobre discos de acero AISI 1020, con carga de 5 N y distancia de deslizamiento de 1000 m

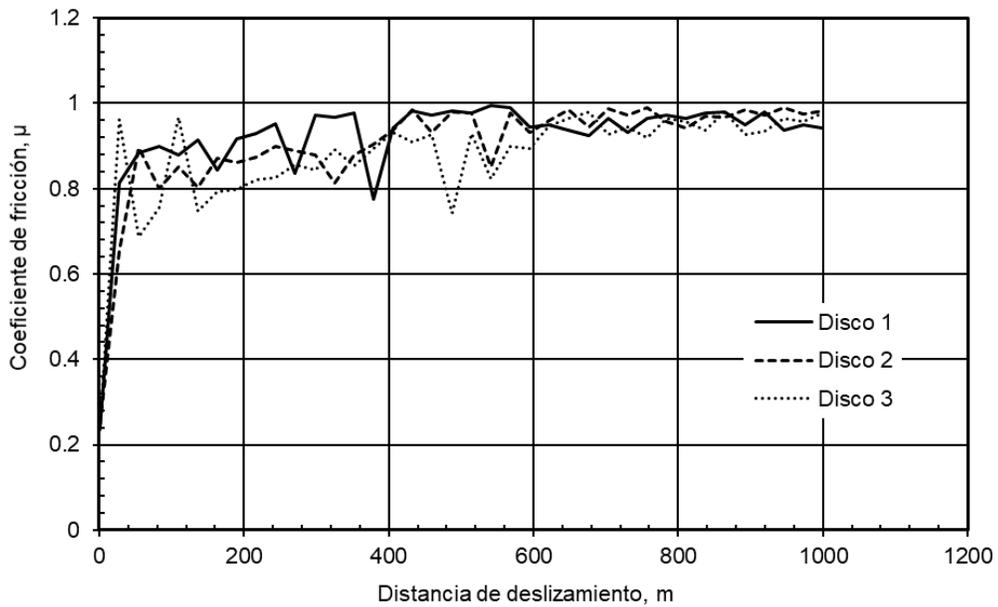


Fig. 3.2. Curvas de coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento de ensayos de desgaste de espigas de acero AISI O1 sobre discos de acero AISI 1020, con carga de 10 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.

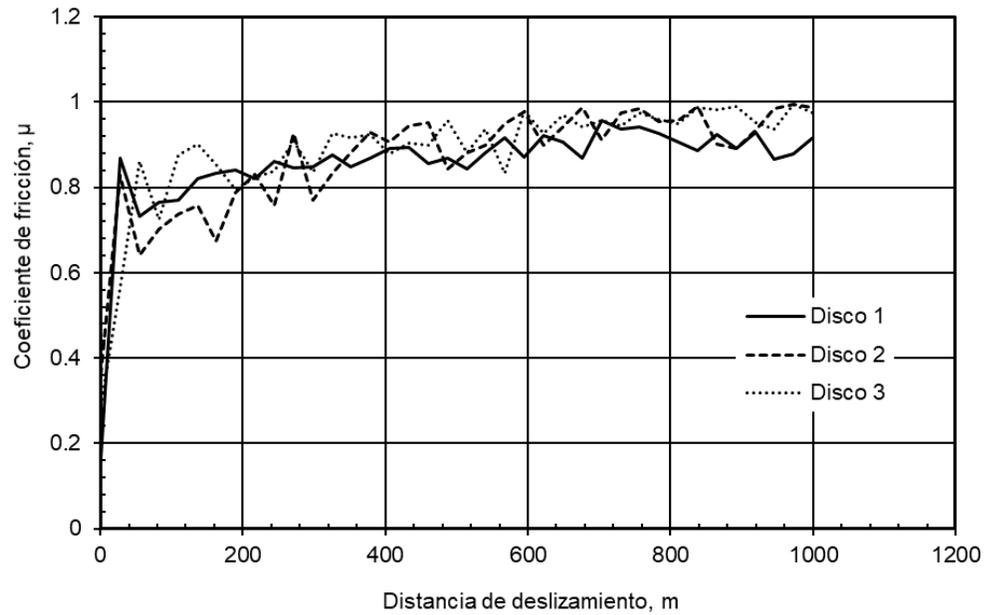


Fig. 3.3 Curvas de coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento de ensayos de desgaste de espigas de acero AISI O1 sobre discos de acero AISI 1020, con carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.

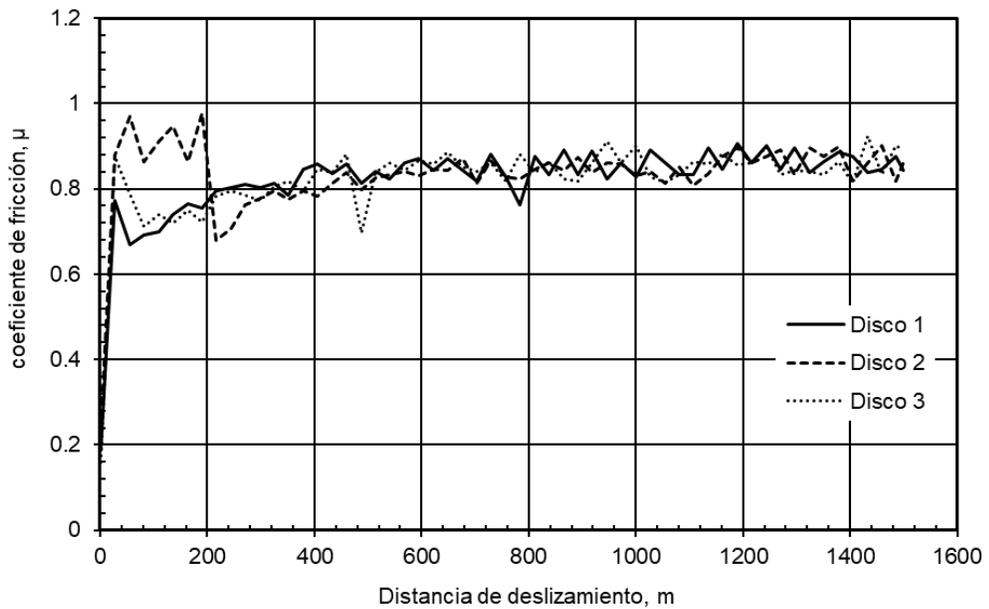


Fig. 3.4 Curvas de coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento de ensayos de desgaste de espigas de acero AISI O1 sobre discos de acero AISI 1020, con carga de 5 N y distancia de deslizamiento de 1500 m.

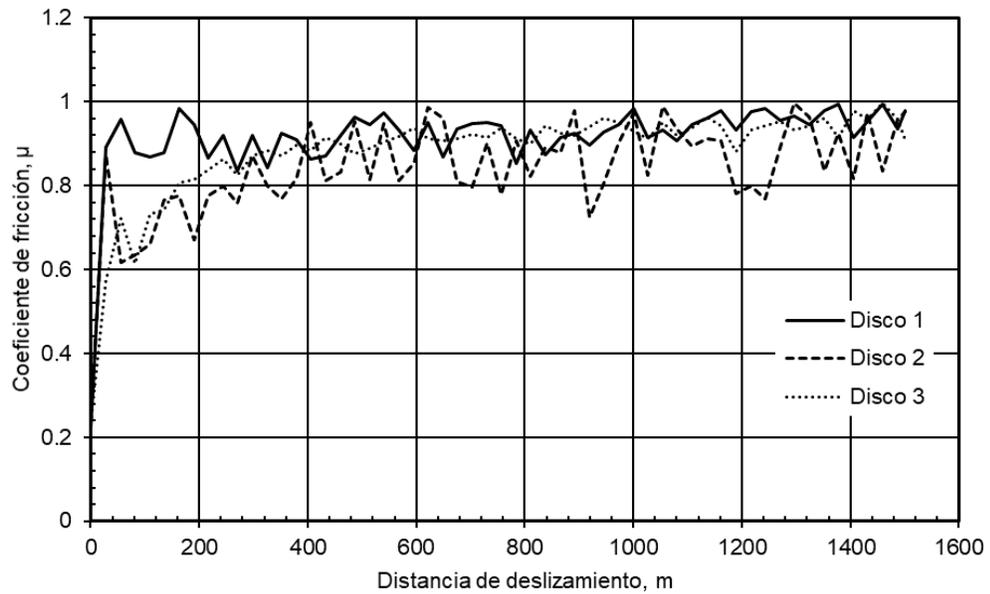


Fig. 3.5 Curvas de coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento de ensayos de desgaste de espigas de acero AISI O1 sobre discos de acero AISI 1020, con carga de 10 N y distancia de deslizamiento de 1500 m.

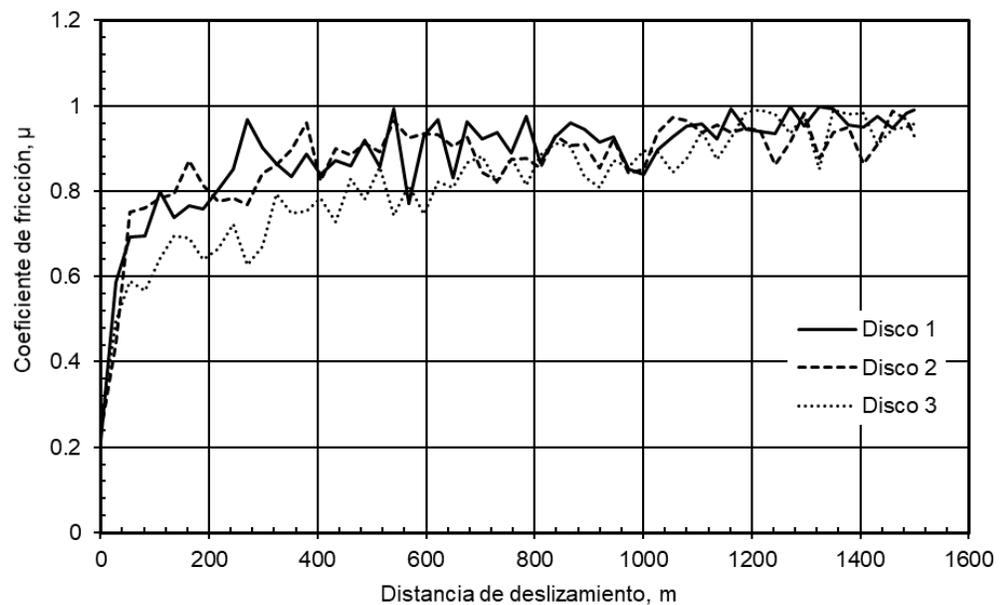


Fig. 3.6 Curvas de coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento de ensayos de desgaste de espigas de acero AISI O1 sobre discos de acero AISI 1020, con carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 1500 m.

3.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Después de obtener y presentar los resultados adquiridos mediante los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco y de las mediciones de pérdida de masa de los diferentes especímenes, se presenta el procesamiento de los datos obtenidos una vez concluidos los ensayos de desgaste en el cual 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.

3.3.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DESGASTE

En las Tablas 3.4 y 3.5 se presentan los cálculos estadísticos de los valores de desgaste (diferencia de masa) para los discos y las espigas respectivamente. 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 notable la diferencia del desgaste en los discos de acero AISI 1020 con respecto al incremento de carga y distancia de deslizamiento tal como se presenta en la Tabla 3.4, en la cual se presenta que a medida se incrementan este par de variables se presenta mayor pérdida de masa de los especímenes mostrando la menor pérdida e incluso casi despreciable en el ensayo de desgaste corresponde a las carga de 5 N y la distancia de deslizamiento de 1000 m caso contrario se demuestra en el ensayo correspondiente a la carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 1500 m que presenta la mayor pérdida de masa registrada en todas las condiciones de ensayo como se puede visualizar más claramente en la Fig. 3.7 la cual presenta que es el valor más distante de los demás, además se puede observar que la pérdida de masa con respecto a la carga sigue una tendencia línea.

Tabla 3.4. Valores de desgaste de los discos para los ensayos realizados.

Distancia, m	Carga, N	Promedio, g	DE, g	Error Estándar, g	Mínimo, g	Máximo, g
1000	5	0.0126967	0.0105868	0.0061123	0.0006652	0.0205868
	10	0.0346544	0.0245666	0.0141835	0.0093671	0.0584305
	15	0.0810836	0.0627308	0.0362177	0.0087162	0.1199838
1500	5	0.0037393	0.0057557	0.0033231	0.0002898	0.0103838
	10	0.0516685	0.0685049	0.0395514	0.0100536	0.0142173
	15	0.1674593	0.0136879	0.0079027	0.1537714	0.1811472

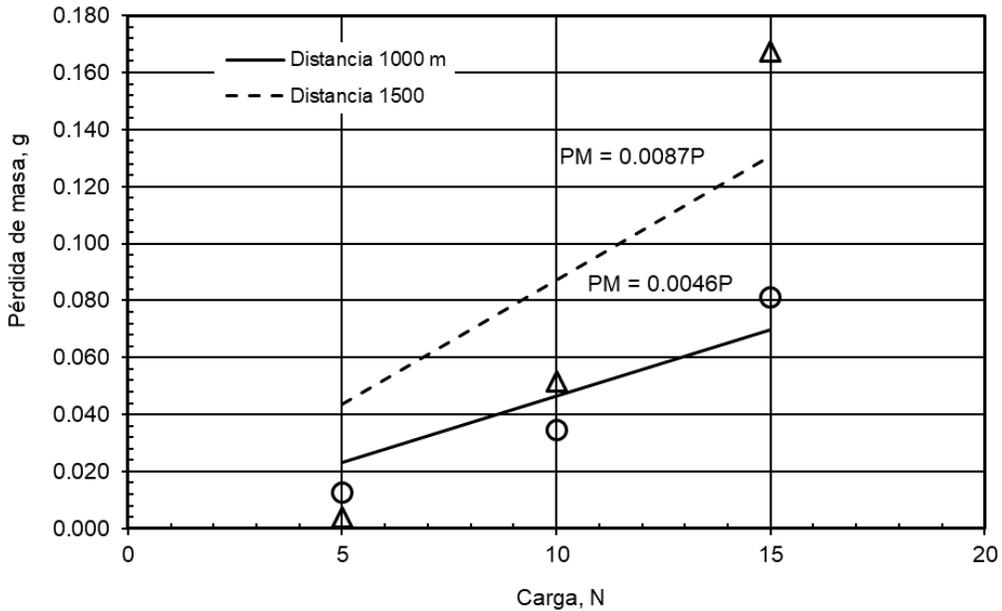


Fig. 3.7. Curvas de pérdida de masa en discos de acero AISI 1020 con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida de 1000 y 1500 m, con cargas de 5, 10 y 15 N.

La Tabla 3.5 deja en evidencia la pérdida de masa mínima que se da en las espigas de acero AISI O1 con respecto a los discos de acero AISI 1020, considerando que dichas espigas fueron templadas y revenidas, así dicho tipo de resultado es el esperado; además, se puede identificar que el mayor valor registrado de pérdida de masa se presenta para las condiciones de la mayor carga y la mayor distancia de deslizamiento (15 N y 1500 m), en la Fig. 3.8 se presenta una tendencia lineal generada por la pérdida de masa con respecto a la carga aplicada en los diferentes ensayos.

Tabla 3.5. Valores de desgaste de las espigas para los ensayos realizados.

Distancia, m	Carga, N	Promedio, g	DE, g	Error Estándar, g	Mínimo, g	Máximo, g
1000	5	0.0005423	0.0003589	0.0002072	0.0003334	0.0009567
	10	0.0007761	0.0003907	0.0002256	0.0003733	0.0011534
	15	0.0007661	0.0006642	0.0003835	0.0003417	0.0015316
1500	5	0.0007967	0.0000700	0.0000404	0.0007184	0.0008533
	10	0.0014633	0.0005313	0.0003067	0.0008500	0.0017583
	15	0.0012739	0.0006740	0.0003891	0.0008617	0.0020517

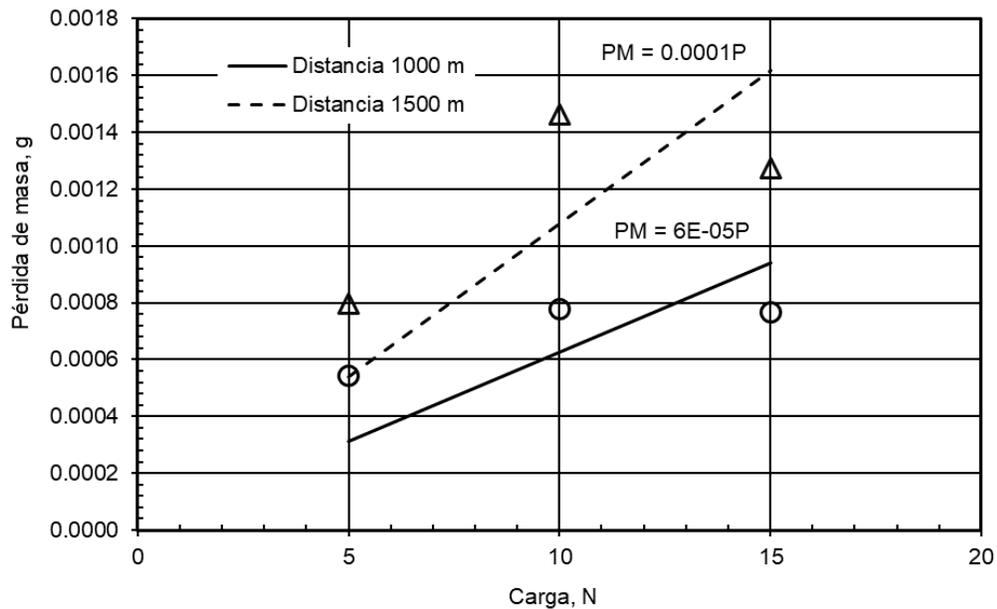


Fig. 3.8. Curvas de pérdida de masa en espigas de acero AISI O1 con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida de 1000 y 1500 m, con cargas de 5, 10 y 15 N.

De los resultados obtenidos de los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco con sus correspondientes mediciones de masa, se obtuvo una pérdida de masa, la cual aumenta conforme se incrementa la carga normal aplicada a las superficies en contacto y la distancia de deslizamiento durante los ensayos, dando como resultado la mayor pérdida de masa registrada con una carga aplicada de 15 N en comparación con las cargas de 5 y 10 N, y con distancia de deslizamiento de 1500 m en comparación con la de 1000 m.

Lo anterior es debido a que el incremento de carga genera una mayor área de contacto; además, el incremento en la distancia recorrida en la misma

proporción de tiempo genera el efecto que produce el desgaste manteniendo constante los otros parámetros de los ensayos.

3.3.2 ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN

De las Fig. 3.1 a 3.6, se presenta que existe una tendencia al incremento del coeficiente de fricción en los primeros 200 m de deslizamiento; también, en algunos casos, el coeficiente de fricción presenta pequeños incrementos hasta los 400 m, pero generalmente se mantuvo fluctuante entre los valores obtenidos durante el intervalo de 400 a 600 m. En la Tabla 3.6 se presenta los valores promedio de coeficiente de fricción obtenidos para cada combinación de variables del ensayo.

Así mismo, se puede identificar que el valor promedio del coeficiente de fricción entre este par de materiales para las diferentes cargas incrementa gradualmente a medida que incrementa la carga, siendo los coeficientes similares para ambas distancias de deslizamiento, por lo tanto, se corrobora que el coeficiente de fricción es independiente de la distancia de deslizamiento a la cual es sometido el material.

Tabla 3.6. Valores promedio del coeficiente de fricción entre pares discos de acero AISI 1020 y espigas de acero AISI O1 respectivamente.

No.	Distancia, m	Carga, N	Promedio por ensayo de μ	Promedio por condición de ensayo de μ	DE de μ
1	1000	5	0.769	0.823	0.07223293
2			0.795		
3			0.905		
4		10	0.919	0.899	0.02172082
5			0.902		
6			0.876		
7		15	0.854	0.870	0.0171749
8			0.870		
9			0.888		
10	1500	5	0.821	0.825	0.0068584
11			0.833		
12			0.822		
13		10	0.916	0.880	0.03768549
14			0.841		
15			0.882		
16		15	0.883	0.856	0.03591261
17			0.870		
18			0.815		

4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE DESGASTE EN ACERO AISI 1020

En este capítulo se presenta un análisis de los resultados que se obtuvieron en los diferentes ensayos de desgaste citados en el capítulo 1 en los cuales se considera condiciones del material, variables y parámetros que se seleccionaron para cada ensayo. Así, se toman como análisis el coeficiente de fricción, durezas y pérdidas de masa registradas considerando también los resultados experimentales obtenidos en este trabajo o investigación.

4.1 COEFICIENTE DE FRICCIÓN

Cuando se realiza el contacto entre dos superficies es necesario aplicar una fuerza horizontal para dar inicio al deslizamiento, la fuerza necesaria para mantener el deslizamiento debe ser mayor que la fricción cinética entre las dos superficies. El coeficiente de fricción se define como la fuerza de fricción por unidad de carga aplicada dicha fuerza de fricción se puede obtener por medio de un módulo de ensayos que muestra la lectura de la fuerza a medida que se desarrolla el ensayo, otra forma de obtención del coeficiente de fricción es la que se presenta en la Ec. 1.16 donde se encuentra una relación directa con el volumen reportado en la pérdida de material cabe destacar que el uso de esta ecuación sólo se ha aplicado en el ensayo de cilindros cruzados.

La gráfica mostrada en el ensayo de cilindros cruzados muestra una curva generada por el coeficiente de fricción con respecto al tiempo la cual muestra un comportamiento creciente e indica que el incremento mostrado depende de las características superficiales y los agentes contaminantes presentes en el material que se está ensayando, en la investigación de desgaste de espiga sobre disco donde muestra el comportamiento del coeficiente de fricción del acero en estado comercial en el cual se utiliza el par de probetas del mismo acero se identifica la tendencia de la gráfica la cual da un incremento en los primeros segundos de

iniciada la prueba hasta lograr que la gráfica se estabilice y se mantenga en un incremento y decremento de los valores pero manteniéndose en el mismo intervalo hasta la finalización del ensayo que fue realizado con una carga de 9.79 N, de igual manera se presenta un comportamiento similar en los resultados obtenidos para el coeficiente de fricción de este trabajo en el cual se presenta gráficos con diferentes cargas y velocidad, en la cual se obtiene que aun con diferentes cargas el comportamiento de las gráficas es similar al anterior el cual muestra un incremento acelerado en el inicio del ensayo para posteriormente encontrar un equilibrio en el intervalo de valores, así esto demuestra que el coeficiente de fricción no depende directamente de la carga aplicada, nótese también que en la presentación de los tres comportamientos obtenidos en los diferentes ensayo el coeficiente de fricción nunca logra alcanzar el valor de uno aunque en algunos casos suele acercarse.

4.2 DETERMINACIÓN DE DUREZA

Es difícil definir la propiedad de la dureza excepto en relación con la prueba empleada en particular para determinar su valor de esta manera la dureza se puede definir como la resistencia del metal a la deformación plástica generalmente por indentación, debe tenerse en cuenta que un número o valor de dureza no puede utilizarse directamente con un trabajo de diseño. La dureza del acero AISI 1020 en su estado comercial tiende a estar en el intervalo de 88 a 97 HRB, los resultados obtenidos en la medición de dureza de las investigaciones desarrolladas con este acero muestran la dureza obtenida es de 74.23 HRB de igual manera la dureza del acero registrado en este trabajo presenta un valor promedio de 90.28, ambos valores se encuentran en el intervalo registrado en la literatura.

Debido a su bajo contenido de carbono este acero es ideal para ser sometido a tratamiento termoquímicos para obtener un incremento de dureza superficial dichos tratamientos pueden ser el cementado, temple y revenido los

cuales han sido tema de estudios en las investigaciones mencionadas en el capítulo 1, en donde dos de ellas se han basado en el incremento de dureza por medio de cementación una utilizando carbón obtenido de borra de café y templado en dos medios a diferentes temperaturas el mayor valor de dureza obtenido es el de 59.13 HRC la cual fue templada en agua, la siguiente investigación muestra un cementado con una mezcla de carbón vegetal y carbonato de bario en una proporción 80:20 respectivamente la cual muestra una dureza promedio de 47.82 HRC el cual fue templado en aceite con revenido, estos resultados demuestran que la mayor obtención de dureza se obtiene con el cementado realizado con carbón obtenido de café cabe citar también que la diferencia de las durezas se deba a que en el cementado con carbón vegetal y carbonato de bario se aplicó un revenido posterior y el temple realizado en aceite el cual es mucho menos abrupto que el realizado en agua por lo que la dureza obtenida sea menor otra consideración que de deba tomar para elegir el tratamiento térmico ideal es el espesor de capa cementada que se debió obtener en cada uno de los casos.

La tercera investigación que muestra resultados de dureza es el de tratamiento térmico de temple y revenidos a diferentes temperaturas, el mayor valor de dureza registrado es de 701 HV el cual fue obtenido con un temple a 800 °C, debido a que esta dureza es registrada en la escala Vickers se necesita tener un equivalente en la escala Rockwell que fue utilizada en los trabajos anteriores para dicho análisis se hace uso de la tabla de conversión de durezas utilizada del libro de Avner la cual muestra una dureza equivalente aproximada de 60.2 HRC.

4.3 PÉRDIDAS DE MASA

El análisis de pérdida de masa se realizó tomando mediciones de la masa de discos o espigas al inicio y final de los ensayos de desgaste con el uso de una balanza y reportando la diferencia de valores registrados. Este análisis se ha realizado en la mayoría de las investigaciones mencionadas en el capítulo 1

exceptuando la investigación que analiza la resistencia al desgaste abrasivo de un acero AIS 1020 templado a una temperatura de 800 °C y revenido a diferentes temperaturas en donde el punto de análisis es el volumen perdido, para lograr relacionar ambas pérdidas se hace uso de la Ec. 1.17 la cual relaciona la disminución del volumen de la probeta con la pérdida de masa de material con ayuda de la densidad del acero la cual en estos casos es la misma para todas las investigaciones.

Al analizar las investigaciones se logra concluir que al incrementan la carga y la distancia de deslizamiento incrementa la pérdida de masa tanto en discos como en espigas como se puede observar en el estudio de desgaste tipo espiga sobre disco, utilizando un acero AISI 1020 cementado y un acero AISI O1 y en los resultados obtenidos en esta investigación en donde en ambos estudios se obtuvo mayor pérdida de masa en las carga de 15 N y en la distancia de deslizamiento de 1500 m que son la mayor carga y distancia de deslizamientos utilizados en estos ensayos. También, se puede observar los beneficios que obtienen los aceros al realizarles tratamientos termoquímicos como es el caso de la cementación ya que la pérdida de masa es menor en los discos con tratamiento termoquímico en comparación de los discos metal base. Con respecto a los tratamientos térmicos aplicables en el acero AISI 1020 se pueden obtener mayores beneficios cuando se realizan revenidos a bajas temperaturas y temple en agua lo que incrementa la dureza por lo cual disminuye la pérdida de masa.

Otro parámetro que se considera en los ensayos realizados es la velocidad en la cual se realizó, en el estudio que muestra el comportamiento del coeficiente de fricción y pérdida de masa, del acero en estado comercial indica que el aumento en la velocidad de ensayo conlleva a la reducción en la pérdida de masa y por consiguiente reducción en el desgaste del material. El aumento en la carga normal aplicada durante el contacto lleva al aumento en la pérdida de masa y por consiguiente al aumento en el desgaste del material.

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 pérdida de masa del acero AISI O1 es mínima en comparación a la pérdida de masa obtenida para el metal base de acero AISI 1020, lo cual se puede atribuir a la alta dureza que presenta el material al haber sido sometido a un tratamiento térmico de temple y revenido a baja temperatura (200 °C).
- La pérdida de masa aumenta conforme se incrementa la carga normal aplicada a las superficies en contacto y la distancia de deslizamiento, dando como resultado la mayor pérdida de masa registrada con una carga aplicada de 15 N y distancia de deslizamiento de 1500 m, debido a que se incrementa el área de contacto y además incrementa el tiempo de permanencia de la carga.
- Los coeficientes de fricción se incrementan en los primeros segundos de los ensayos, lo cual se atribuye a lo pulido de las superficies y su acoplamiento, seguido de un comportamiento estable en donde se evidencia que el coeficiente de fricción no depende directamente de la carga aplicada in obviar otros parámetros como la superficie de los materiales en contacto entre otras.
- De las investigaciones recopiladas, el incremento de dureza favorece en mayor medida al acero ya que incrementa la resistencia al desgaste, el tratamiento termoquímico de cementación presenta buenos resultados con un post tratamiento térmico de temple en agua y revenido a baja temperatura, ya que durante la cementación y el post tratamiento térmico en el acero se obtiene una capa superficial con mayor dureza.

- Las investigaciones realizadas al acero AISI 1020 son de suma importancia ya que nos pueden mostrar el comportamiento de este bajo diferentes situaciones de desgaste los cuales pueden servir como parámetros para el diseño de piezas que se necesiten realizar con ese acero además de mostrar la importancia de los tratamientos térmicos para endurecer la superficie de este y mejorar sus propiedades y resistencia al desgaste.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Avner, S. H. (1988). Introducción a la Metalurgia Física. México: McGraw-Hill.
- [2] Sampen, L. (2003). Pautas para el diseño de partes metálicas Resistentes al desgaste.
- [3] Sarkar, A. D. (1990). Desgaste de los Metales. México: Limusa.
- [4] Halliday, J. S. (1955). Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers.
- [5] Archard, J. F. (1957). Proceedings of the Royal Society A.
- [6] Halling, J. (1975). Principles of tribology.
- [7] D., Bowden F. P. y Tabor. (1964). The fricción and lubrications of solid.
- [8] Tomlinson, G. A. (1929). Philosophical magazine.
- [9] Lancaster, J. K. (1957). Proceedings of the physical society.
- [10] Hughes G. y Spur R T. (1955). Proceedings of the physical society B.
- [11] International ASTM, A. (s.f.). Norma G 99-04.
- [12] Barreiro, J. A. (1986). Aceros Especiales y Otras Aleaciones. Madrid: Dossat, s.a.
- [13] Lajtin, Y. & Arzamasov, B. (1987). Tratamiento Químico Térmico de los Metales. Moscú: Mir
- [14] Trisancho R., J. L., Higuera c., O. F., & Flores G., L. C. (2007). Evaluación del Desgaste Adhesivo del Acero AISI-SAE 1020. Scientia Et Technica.
- [15] Perez Ruiz, E., López Vanegas, E. M., & García Vanegas, J. A. (2013). Comportamiento del Coeficiente de Fricción y Pérdida de masa, del Acero 1020 en Estado Comercial en la Ciudad de Ibagué.
- [16] Cruz Segura, F., & Socha Hernandez, R. (2015). Análisis de la Resistencia al Desgaste Abrasivo de un Acero AISI-SAE 1020 Templado a una Temperatura de 800 °C y Revenido a Diferentes Temperaturas.
- [17] Cetina Peña , J. S. (2019). Evaluación de la Resistencia al Desgaste Adhesivo del Acero AISI 1020 Cementado con Carbón Obtenido a Partir de la Biomasa de Café.
- [18] García Ramírez, G. R. (2017). Estudio de Desgaste Tipo Espiga Sobre Disco, Utilizando un AISI 1020 Cementado y un Acero O1.