

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



**ESTUDIO DE DESGASTE TIPO ESPIGA SOBRE DISCO,
DE UN ACERO AISI O1 SOBRE UN ACERO AISI 4340
SIN Y CON CALZADOS**

PRESENTADO POR:

IVÁN DANILO LUNA SÁNCHEZ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE 2019

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

M.Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIA GENERAL :

M.Sc. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

Dr. EDGAR ARMANDO PEÑA

SECRETARIO :

Ing. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR INTERINO :

Ing. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN

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

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO MECÁNICO

Título

:

**ESTUDIO DE DESGASTE TIPO ESPIGA SOBRE DISCO,
DE UN ACERO AISI O1 SOBRE UN ACERO AISI 4340
SIN Y CON CALZADOS**

Presentado por

:

IVÁN DANILO LUNA SÁNCHEZ

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor

:

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

San Salvador, noviembre de 2019

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

DEDICATORIA

Este trabajo de graduación está dedicado a:

Mis hijos:

Daniela Luna y Danilo Luna.

Mi esposa:

Olga de Luna.

Y a mis padres:

Hermes Luna y Rosa de Luna.

Juán Luna.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco a Dios por la salud, fortaleza y protección que me brindó durante todo este tiempo “hasta aquí me ayudó Jehová”; asimismo, a mi esposa, a mi hija Daniela Luna y mi hijo Danilo Luna por toda la paciencia y el apoyo incondicional que me han dado en estos años de estudio; también, a mi hermana Aleyda Luna por su apoyo, a mi cuñado Hildo y de especial manera agradezco a mis padres por permitirme conocer a Dios y a Dios por darme la oportunidad de tenerlos conmigo; además, extendiendo mi agradecimiento al señor Roberto Chávez y a su hijo Josué Chaves por el aporte en el desarrollo de este trabajo de graduación, de igual forma agradezco al personal de los talleres J.R. BUCHIN-CH por su importante apoyo en el proceso de maquinado.

Posteriormente, agradezco a todas las personas que directa o indirectamente colaboraron con el desarrollo de este trabajo de graduación. Comenzando con mi asesor Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz por la guía, el apoyo y la confianza; al personal del Centro de Investigaciones de Metrología de la Universidad de El Salvador, de manera especial a los Ingenieros Mecánicos Jairo y Eliseo por realizar las mediciones de masa, su aporte fue esencial para el desarrollo del trabajo de graduación; mil gracias a la licenciada Rosario Villalta y a la Unidad de Atención a Estudiantes con Discapacidad por todo el apoyo que me brindaron.

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 que siempre me brindaron su apoyo y por ultimo pero no menos importante agradezco a mis primos Jonathan y Jared Sánchez a todos en verdad gracias.

Juán Luna.

ESTUDIO DE DESGASTE TIPO ESPIGA SOBRE DISCO, DE UN ACERO AISI O1 SOBRE UN ACERO AISI 4340 SIN Y CON CALZADOS

Estudiantes: Br. Iván Danilo Luna Sánchez¹
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 llevado a cabo un estudio de desgaste haciendo uso del método de ensayo tipo espiga sobre disco, utilizado discos de acero AISI 4340 sin y con calzados y espigas de acero AISI O1 con tratamiento térmico de temple y revenido. Los calzados se realizaron con electrodo AWS 7018 y electrodo AWS UTP-65. Los ensayos se realizaron a 3 cargas diferentes, a una misma distancia de deslizamiento y para cada condición de ensayo se realizaron 3 pruebas. Es importante destacar que los discos con calzados presentaron menor pérdida de masa que los discos de metal base.

1 E-mail: vandanlu2@gmail.com

2 E-mail: jaberriosortiz@gmail.com

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Desgaste.....	3
1.1.1 Tipos de desgaste.....	4
1.1.2. Estudio de la fricción.....	5
1.2. Teoría molecular de la fricción y del desgaste.....	8
1.2.1 Desgaste por fricción.....	10
1.2.2. Desgaste por adherencia.....	12
1.2.3. Desgaste por abrasión.....	17
1.2.4. Transferencia metálica durante el desgaste.....	19
1.3. Variables que afectan el proceso de desgaste.....	21
1.3.1. Efecto de la temperatura y la velocidad.....	21
1.3.2. Efecto de la carga y la distancia de deslizamiento.....	26
1.4. Estudios de desgaste.....	28
1.4.1. Tipos de máquinas para realizar ensayos de desgaste.....	28
1.4.2. Norma de la ASTM G99 para ensayos de desgaste.....	32
1.4.3. Resumen del método de ensayo.....	33
1.5. Generalidades del acero AISI 4340.....	34
1.6. Generalidades del electrodo AWS E-7018.....	35
1.7. Generalidades del electrodo AWS UTP-65.....	35
1.8. Proceso de calzado.....	36
2. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	40
2.1. Diagrama de flujo del diseño experimental.....	40
2.2. Dimensionamiento de los discos y espigas para los ensayos de desgaste.....	42
2.3. Maquinado de las probetas.....	43
2.4. Preparación de las discos a calzar.....	45
2.4.1. Limpieza de probetas.....	47
2.5. Rectificado de las probetas.....	48

	Pág.
2.6. Maquinado y tratamiento térmico de las espigas.....	49
2.7. Preparación de los especímenes para ensayo de desgaste tipo espiga sobre disco.....	52
2.8. Ensayo de desgaste tipo espiga sobre disco.....	55
2.6. Determinación de dureza.....	59
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	63
3.1 Determinación de dureza rockwell.....	63
3.2 Resultados de los ensayos de desgaste.....	64
3.3. Análisis de resultados.....	74
3.3.1. Análisis estadístico de desgaste.....	74
3.3.2. Análisis del coeficiente de fricción.....	77
CONCLUSIONES.....	80
BIBLIOGRAFÍA.....	82

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1. Espiga hemisférica deslizando sobre una superficie bajo la acción de una carga: (a) espiga estacionaria; y (b) espiga en movimiento, produciendo una huella en forma de ranura.....	6
Figura 1.2. Curva característica de la razón de desgaste vs distancia de deslizamiento.....	11
Figura 1.3. Razón de desgaste vs presión de contacto aparente (Burwell y Strang, 1952).....	14
Figura 1.4. 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
Figura 1.5. Variación de la razón del desgaste en función de la temperatura para un latón (60/40), sobre acero para herramientas.....	23
Figura 1.6. Razón de desgaste en relación con el recíproco de la dureza.....	24
Figura 1.7. Variación de la razón de desgaste y la transferencia de metal con la velocidad, utilizando una carga de 22.5 kg.....	25
Figura 1.8. Variación de la razón de desgaste y la temperatura superficial vs velocidad para espigas aisladas térmicamente y enfriadas, utilizando una carga de 3 kg.....	26
Figura 1.9. Desgaste del acero vs acero a 100 kg/cm ² y con lubricante líquido parafínico.....	27
Figura 1.10. Espiga sobre mesa oscilante.....	28
Figura 1.11. Máquina de espiga sobre buje.....	29
Figura 1.12. Cilindros cruzados.....	29
Figura 1.13. Máquina de espiga sobre disco.....	30
Figura 1.14. Tribómetro CSEM.....	31
Figura 1.15. Fales ISC-200PC.....	31
Figura 1.16. Tribómetro FALEX ISC – 200PC.....	32
Figura 2.1. Diagrama de flujo del diseño experimental.....	41
Figura 2.2. Dimensiones de los especímenes. Cotas en mm.....	43
Figura 2.3. Proceso de corte de los discos: a) etapa de corte y b) discos cortados.....	44
Figura 2.4. Torno convencional marca COMEC.....	45
Figura 2.5. Electrodo utilizados para el calzado de los discos: a) E-7018 y b) UTP-65.....	46

	Pág.
Figura 2.6. Proceso del calzado del metal base: a) disco listo para el depósito del calzado, b) disco con el primer cordón de soldadura, c) disco con el segundo cordón de soldadura y d) disco terminado de calzar.....	47
Figura 2.7. Proceso de rectificado: a) rectificadora y b) probeta montada en la rectificadora.....	48
Figura 2.8. Rueda abrasiva tool room blanco tipo 1 de 7½ x 1¼ R.T. 1 89A46K5VA0 (V).....	49
Figura 2.9. Curva de variación temperatura-tiempo para el tratamiento térmico de temple y revenido de las espigas de acero AISI O1.....	50
Figura 2.10. Cámara de gas inerte durante el tratamiento térmico de las espigas.....	51
Figura 2.11. Espigas dispuestas en grupos de 9 piezas listas para realizarles el tratamiento térmico.....	52
Figura 2.12. Discos sin y con calzados, listos para ser ensayados a desgaste.....	53
Figura 2.13. Instrumentos utilizados para la medición de masa.....	55
Figura 2.14. Máquina para ensayos tribológicos marca GUNT, modelo TM 260.3.....	56
Figura 2.15. Módulo para ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco.....	56
Figura 2.16. Durómetro marca RAMS.....	60
Figura 2.17. Penetrador de diamante de geometría cónica utilizado para la escala de dureza Rockwell C.....	61
Figura 3.1. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de un acero AISI 4340 y una espiga de acero AISI O1, con carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.....	68
Figura 3.2. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de discos de acero AISI 4340 y una espiga de acero AISI O1, con carga de 20 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.....	68
Figura 3.3. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de discos de acero AISI 4340 y una espiga de acero AISI O1, con carga de 25 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.....	69
Figura 3.4. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de discos calzados con electrodo E-7018 y una espiga de acero AISI O1, con carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.....	69

	Pág.
Figura 3.5. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de discos calzados con electrodo E-7018 y una espiga de acero AISI O1, con carga de 20 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.....	70
Figura 3.6. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de discos calzados con electrodo E-7018 y una espiga de acero AISI O1, con carga de 25 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.....	70
Figura 3.7. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de discos calzados con electrodo UTP-65 y una espiga de acero AISI O1, con carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.....	71
Figura 3.8. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de discos calzados con electrodo UTP-65 y una espiga de acero AISI O1, con carga de 20 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.....	71
Figura 3.9. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de discos calzados con electrodo UTP-65 y una espiga de acero AISI O1, con carga de 25 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.....	72
Figura 3.10. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de discos sin y con calzados con E-7018 y UTP-65 y una espiga de acero AISI O1, con carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.....	72
Figura 3.11. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de discos sin y con calzados con E-7018 y UTP-65 y una espiga de acero AISI O1, con carga de 20 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.....	73
Figura 3.12. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de discos sin y con calzados con E-7018 y UTP-65 y una espiga de acero AISI O1, con carga de 25 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.....	73
Figura 3.13. . Curvas de pérdida de masa de los discos con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de discos sin y con calzados con E-7018 y UTP-65 y una espiga de acero AISI O1, con cargas de 15, 20 y 25 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.....	75
Figura 3.14. Curvas de pérdida de masa de las espigas con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de discos sin y con calzados con E-7018 y UTP-65, con cargas de 15, 20 y 25 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.....	76
Figura 3.15. . Curvas de valores promedios de fricción entre discos y espigas respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de discos sin y con calzados con E-7018 y UTP-65, con cargas de 15, 20 y 25 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.....	79

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1. Composiciones químicas de los aceros utilizados para la fabricación de los discos y las espigas.....	43
Tabla 2.2. Condiciones y variables bajo las que se harán los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco.....	57
Tabla 3.1. Medición HRC para el acero AISI 4340.....	63
Tabla 3.2. Medición HRC para la superficie calzada con E-7018.....	64
Tabla 3.3. Medición HRC para el calzado con UTP-65.....	64
Tabla 3.4. Valores de desgastes para los discos con y sin calzado.....	66
Tabla 3.5. Valores de desgastes para las espigas de acero AISI O1.....	67
Tabla 3.6. Análisis estadístico del desgaste de los discos medido a partir de su diferencia de masa.....	75
Tabla 3.7. Análisis estadístico del desgaste de la espiga medido por su diferencia de masa.....	76
Tabla 3.8. Valores promedio del coeficiente de fricción entre discos de acero AISI 4340 con y sin calzado y un pin de acero AISI O1.....	78

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

- Ae: Área de contacto elástico
- ASTM: American Society for Testing and Materials
- A_t : Superficie en flujo plástico
- d: Profundidad de indentación
- DE: Desviación Estándar
- E: Módulo de Young
- E-7018: Electrodo AWS 7018
- F: Carga normal a una superficie
- F_f : Resistencia a la fricción
- R: Radio
- MB: Metal base
- n: Número de asperezas por unidad de área
- Ra: Línea central media
- Rs: Raíz media cuadrática
- Rt: Altura máxima de un valle a una cresta
- P: Factor de compresión
- s: Distancia de deslizamiento
- S: Fuerza cortante
- t: Tiempo
- UTP-65: Electrodo AWS UTP-65
- v: Velocidad de deslizamiento
- V: Volumen de material eliminado
- τ : Esfuerzo cortante
- σ : Esfuerzo de compresión
- μ : Coeficiente de fricción
- σ_y : Esfuerzo de fluencia
- Ω : Velocidad angular

INTRODUCCIÓN

El desgaste en los elementos de máquinas es una consecuencia del movimiento relativo de dos o más piezas en contacto sometidas a diversas cargas, el desgaste se traduce como una pérdida de masa de los materiales en contacto. El fenómeno del desgaste está asociado a las direcciones y tipos de movimientos entre las superficies en contacto y el medio que rodea las piezas en el momento de la interacción. Por lo general el desgaste es una de las causas de fallas más comunes en máquinas, esto se da porque en la mayoría de aplicaciones se encuentran sujetas a distintos rozamientos entre piezas de distinta naturaleza. Para reducir la pérdida de masa en materiales, se han desarrollado técnicas y procedimientos que extiende la vida útil de una pieza de máquina, una de estas técnicas es el calzado de piezas, con esta técnica se permite recuperar la masa perdida en una pieza, alargando la vida útil y se logra que la pieza sea capaz de absorber cargas de impacto y se incremente su resistente al desgaste.

Con equipos adecuados es posible determinar el comportamiento ante la fricción y el desgaste entre dos materiales, los parámetros de operación de estos equipos permiten crear las condiciones de simulación necesarias para analizar con precisión el comportamiento del desgaste en distintas condiciones de ensayos. Un equipos utilizado en este procedimiento tribológico es la máquina para ensayos tipo espiga sobre discos, la cuál será utilizada en el presente trabajo para caracterizar el comportamiento al desgaste de un acero AISI 4340 con y sin calzados y un acero AISI O1 bajo diferentes parámetros de ensayos.

Se inicia este trabajo de graduación con la definición del desgaste, como parte principal y posteriormente se enfoca, este trabajo, en los demás conceptos y consideraciones que se harán durante el estudio de desgaste tipo espiga sobre disco. Se describen los tipos de desgaste y se hace una descripción del ensayo tipo espiga sobre disco, para tener una idea de los parámetros y normas que rigen este tipo de ensayo de desgaste.

Se incluye dentro del primer capítulo una descripción del procedimiento referente al calzado de piezas con la técnica de aporte de material por medio de soldadura por arco eléctrico, ya que esta técnica será la utilizada durante la investigación.

El segundo capítulo está enfocado en el diseño experimental de la investigación, su contenido consta de las diferentes etapas en el desarrollo del ensayo tipo espiga sobre disco, desde el dimensionamiento de los discos y de las espigas, maquinado de los mismos, la ejecución del tratamiento térmico en las espigas y, posteriormente, se describe la realización de los ensayos tipo espiga sobre disco, estableciendo las diferentes combinaciones de carga a la misma distancia de deslizamiento y condición de material.

En el tercer capítulo se presenta la medición de dureza Rockwell C de los discos de acero AISI 4340 y discos calzados con electrodo AWS E-7018 y AWS UTP-65, y los resultados obtenidos durante el desarrollo experimental, estos resultados y el análisis correspondiente de los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco, permitirán realizar el análisis estadístico del desgaste medido por la pérdida de masa y por último se presenta el análisis del coeficiente de fricción entre el disco y la espiga bajo las diferentes condiciones de carga a la misma distancia de deslizamiento (mil metros).

1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los conceptos principales que proporcionarán un punto de inicio para el estudio del desgaste, a su vez se describen diferentes estudios que se realizaron para caracterizar al desgaste algunos materiales metálicos, haciendo énfasis en el estudio de desgaste tipo espiga sobre disco. Por último, se presenta un apartado referente a las técnicas de calzado.

1.1. DESGASTE

Cuando una pieza presenta indicios de pérdida de material, es evidencia que sufre un proceso de desgaste, así en los elementos de máquinas este proceso se puede definir como la pérdida de material por el movimiento relativo de dos o más piezas en contacto que soportan una carga. Así, en términos generales, se sabe que el movimiento puede ser unidireccional o de vaivén, ya sea deslizantes o de rodamiento. Además, de existir una de los casos antes descritos, el desgaste se puede deber a un movimiento oscilante de pequeñas amplitudes (Sampén, 2003).

Se sabe que el desgaste es una de las causas de fallas más comunes de los aceros, debido a que es inherente al contacto entre dos superficies. Así, con el fin de obtener piezas resistentes al desgaste, se han desarrollado técnicas de calzados, entre las cuales se encuentran los realizados mediante electrodo E-7018 y UTP-65, estos tipos de calzados permiten obtener piezas con un núcleo tenaz, capaz de absorber cargas de impacto y una capa externa resistente al desgaste (Sarkar, 1990).

1.1.1. TIPOS DE DESGASTE

El desgaste se puede clasificar de acuerdo a la naturaleza de las superficies en contacto, como son metal contra metal, metal contra no metal y metal contra fluido (Sampén, 2003).

Sin embargo, dado que la naturaleza de las superficies en contacto puede cambiar súbitamente, y lo que era metal contra metal podría volverse metal contra no metal, o bien una lubricación que en un principio era adecuada podría fallar posteriormente; por esta razón la clasificación anterior pierde validez al aplicarla en situaciones reales. Es por ello que se prefiere clasificar al desgaste aplicando la terminología de Burwell (1958) con la cual es posible establecer la causa primaria de cada forma de desgaste. Según Burwell (1958) los tipos principales de desgaste son por adhesión, por abrasión, por erosión, por cavitación y por vibración (Sarkar, 1990).

El **desgaste por adhesión** ocurre cuando dos superficies se deslizan una sobre la otra o existe una presión que mantiene unidas a dichas superficies. La tendencia de dos superficies en contacto a adherirse proviene de fuerzas de atracción que existe entre los átomos de la superficie de ambos materiales. Si estas dos superficies en contacto se separan posteriormente mediante la aplicación de una fuerza normal o tangencial, las fuerzas de atracción entre los átomos generan un esfuerzo que causa el desprendimiento de material de una superficie hacia la otra y viceversa. El material desprendido tiene forma de partículas pequeñas que normalmente se transfieren a la otra superficie o se encuentran como partículas sueltas fuera de dicha superficie (Sarkar, 1990).

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

El **desgaste por erosión** es causado por un fluido a alta presión con partículas sólidas en suspensión las cuales al impactar sobre una superficie arrancan material de ella debido a los efectos de momentum de las partículas. La pérdida de material puede ser significativa, provocando fractura por fatiga. El grado de desgaste tiene relación con el ángulo de incidencia de la partícula con respecto a la superficie (Sarkar, 1990).

El **desgaste por vibración** se produce entre dos superficies que tienen movimiento oscilatorio relativo de pequeña amplitud, del cual se forman partículas abrasivas que originan cavidades en la superficie a medida que la oscilación continúa (Sarkar, 1990).

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

1.1.2. ESTUDIO DE LA FRICCIÓN

La fricción es el punto más importante a tomar en consideración cuando se realiza un estudio de desgaste, pues ésta es la que genera el desprendimiento de material, por lo tanto se debe tener especial cuidado y conocer cómo se desarrolla este fenómeno.

Bodwen y Tabor (1964) consideraron la resistencia a la fricción entre dos superficies como la suma de dos componentes: una a cortante y la otra de compresión. Si nuevamente se considera que una espiga hemisférica se apoya sobre una superficie plana bajo la acción de una carga normal F , esto ocasionará que en la superficie plana se forme una curva cóncava AOB cuya altura máxima

es $OC(h)$ y un aplastamiento de cuerda d (diámetro de contacto), tal como se presenta en la Figura 1.1, donde f_f es la resistencia a la fricción, que es la fuerza tangencial necesaria para iniciar el deslizamiento (Sarkar, 1990).

El efecto de la carga F es provocar la deformación de aquellas asperezas de la superficie plana que ha hecho contacto con la espiga. Esto es, las superficies de los dos cuerpos se adhieren donde existe contacto (Sarkar, 1990).

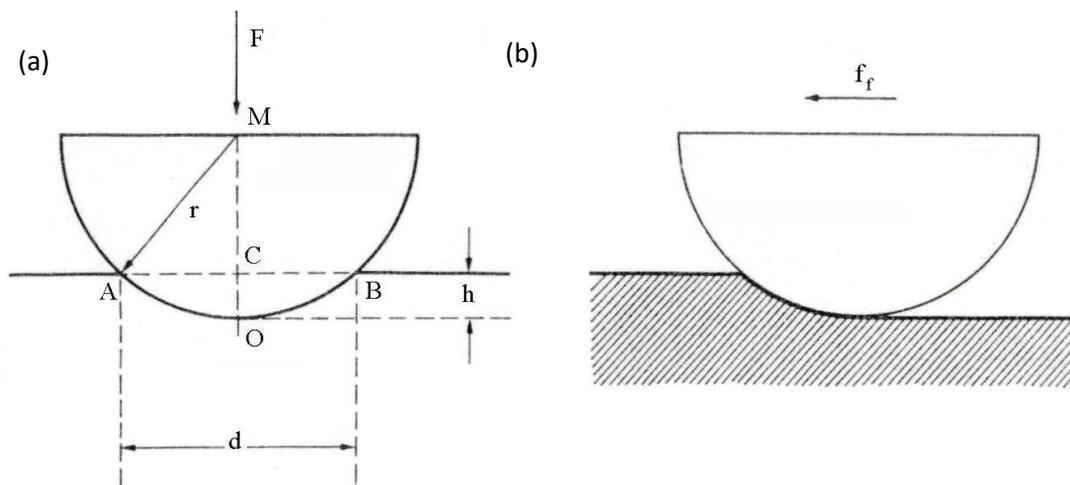


Figura 1.1. Espiga hemisférica deslizando sobre una superficie bajo la acción de una carga: (a) espiga estacionaria; y (b) espiga en movimiento, produciendo una huella en forma de ranura.

Esto provoca que el esfuerzo cortante que hace que las uniones formadas por deformación plástica se rompan completamente antes de que la espiga se pueda mover sobre la superficie. Si τ es el esfuerzo cortante del metal de la superficie que ha fluido plásticamente y A_t es el área de contacto real entre las caras, la fuerza cortante en la superficie (S) se expresa mediante la Ec. (1.1), así:

$$S = A_t \tau \quad (1.1)$$

Es evidente que para mover horizontalmente la espiga en la misma dirección, se requiere de una fuerza adicional para desplazar la pared de metal

delante de ella, a medida que se hunde en el metal de la superficie. Esta fuerza adicional es llamada factor de compresión P , la cual está dado por la Ec. (1.2):

$$P = A' \sigma_y \quad (1.2)$$

donde:

A' es el área de la trayectoria correspondiente al segmento $AOBC$ (área de contacto) tal como se presenta en la Figura 1.1a, la cual está dada por la Ec. (1.3):

$$A' = \frac{d^3}{12r} \quad (1.3)$$

Sustituyendo A' en la Ec. (1.2) se obtiene la Ec. (1.4):

$$P = \frac{d^3}{12r} \sigma_y \quad (1.4)$$

Puesto que la resistencia a la fricción total (f_f) está dada por la suma de los factores de compresión y cortante, se tiene la Ec. (1.5):

$$f_f = S + P = A_t \tau + \frac{d^3}{12r} \sigma_y \quad (1.5)$$

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 indentación es pequeña, de manera que el término d en la Ec. (1.5) puede despreciarse y el factor de compresión se hace insignificante. Por lo tanto, como resultado de este caso se obtiene la Ec. (1.5), así:

$$f_f = A_t \tau \quad (1.5)$$

Por otro lado, el coeficiente de fricción (μ) es la resistencia a la fricción por unidad de carga, y está dado por la Ec. (1.6):

$$\mu = \frac{\tau}{\sigma_y} \quad (1.6)$$

Finalmente, **Amontons (1699)** postuló dos leyes sobre la fricción. La primera ley establece que la fuerza a la fricción es independiente del área aparente de contacto y es sólo proporcional a la fuerza aplicada. La segunda ley establece que el coeficiente de fricción es independiente de la carga aplicada.

1.2. TEORÍA MOLECULAR DE LA FRICCIÓN Y DEL DESGASTE

La teoría molecular de la fricción y del desgaste fue propuesta por **Tomlinson (1929)**, al estudiar detalladamente la naturaleza de las fuerzas atómicas en una red cristalina, deduciendo expresiones para la fricción y el desgaste de sólidos.

La hipótesis de **Tomlinson (1929)**, consiste fundamentalmente que en condiciones de equilibrio las fuerzas de repulsión entre los átomos de un sólido contrarrestan las fuerzas de cohesión. Sin embargo, cuando dos superficies se encuentran en contacto, unos de los átomos de una superficies llegarán a estar lo bastante cerca de otros átomos de la segunda superficie que entrar al campo de repulsión. Cuando esto sucede, las dos superficies se separan causando una pérdida de energía que se manifiesta como la resistencia debida a la fricción.

Cuando un átomo es desplazado de su estado natural de equilibrio, tiende a regresar a su posición original. Sin embargo, durante una separación puede

entrar al campo de atracción de algún átomo vecino, así el átomo en tránsito queda sujeto a una atracción impuesta por una distancia de separación l en ese instante y considerando la fuerza interatómica de cohesión (F_o) entre dos átomos en el cristal. La energía media (E) para un contacto atómico puede expresarse como $E = F_o \cdot l$ y considerando que la energía total perdida es $n \cdot E$, la cual es igual al trabajo mecánico que viene expresado por $\mu \cdot Px$, por lo tanto se obtiene la Ec. (1.7):

$$\mu = \alpha \frac{F_o l}{e p_o} \quad (1.7)$$

donde:

μ es el coeficiente de fricción,

α es el factor de probabilidad,

e es el número de hileras de átomos, y

p_o es el valor medio aritmético de las fuerzas individuales de repulsión.

Los términos F_o y p_o están asociados con las constantes elásticas del material. Además, esta ecuación demuestra que el coeficiente de fricción es independiente de la carga aplicada.

Una hipótesis aceptada para determinar el grado de deformación o proximidad entre dos superficies consiste en que un átomo se puede desprender y moverse a una distancia lo suficiente 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 se pueden extraer por los otros átomos de la superficie opuesta. Según **Tomlinson (1929)**, éste es el mecanismo del desgaste, y se expresa por la Ec. (1.8).

$$M = \frac{2 \alpha E_t \rho}{\mu \sigma_y} \quad (1.8)$$

donde:

M es la masa total de metal eliminado,

ρ es la densidad del metal que se desgasta,

σ_y es el esfuerzo de fluencia,

μ es el coeficiente de fricción,

α es el factor de probabilidad, y

E_t es la energía total disipada.

En la Ec. (1.8) se demuestra que la masa total de material eliminado es inversamente proporcional al esfuerzo de fluencia.

1.2.1. DESGASTE POR FRICCIÓN

Los procesos de desgaste en metales se clasifican según el tipo de mecanismo que cause la eliminación del material de las superficies.

Si la pérdida de volumen o peso se grafica en forma continua relacionándola con la distancia de deslizamiento, se obtiene una curva característica como la que se presenta en la Figura 1.2. El punto O corresponde al encendido de la máquina; es decir, cuando la distancia de deslizamiento es cero.

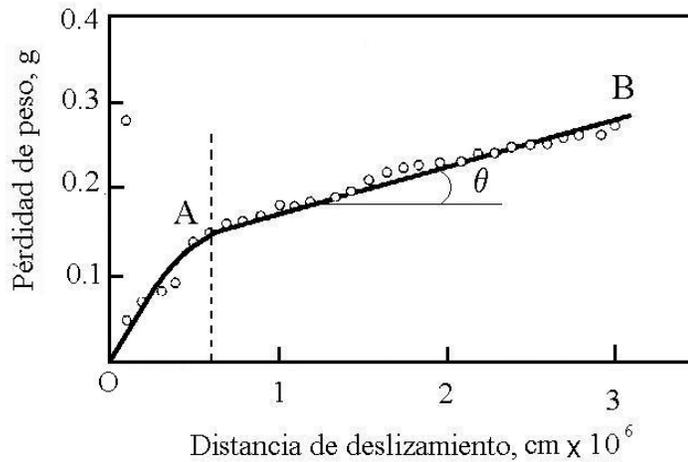


Figura 1.2. Curva característica de la razón de desgaste vs distancia de deslizamiento.

La cantidad perdida de volumen en el régimen determinado por OA es el desgaste inicial y AB es el estado estacionario. La pendiente ($\tan \theta$) del régimen estacionario es lineal y se utiliza para expresar la razón de desgaste de un material por unidad de distancia de deslizamiento a una carga y velocidad determinada, la cual será una constante para cada material, dependiendo de la naturaleza de la otra superficie.

Según el siguiente razonamiento, se puede establecer una ecuación matemática para el desgaste inicial de acoplamiento, también conocida como estado inestable o transitorio, en el instante 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 será:

$$\frac{dV}{dS} = -nV \quad (1.9)$$

donde:

V es el volumen de material eliminado,

n es una constante que depende de la carga aplicada, y

$\frac{dV}{dS}$ es la razón de volumen de desgasta.

El signo negativo representa la situación en la que el volumen original en las uniones disminuye con la distancia de deslizamiento.

1.2.2. DESGASTE POR ADHERENCIA

El desgaste adhesivo, también llamado desgaste por fricción o deslizante, es una forma de deterioro que se presenta entre dos superficies en contacto deslizante.

Por el momento no existen todos los elementos para establecer una ecuación general de desgaste que pueda ser utilizada por los ingenieros de diseño, posiblemente ya que el desgaste es un proceso complejo que depende, entre otras variables de la carga normal, la estructura cristalina y las propiedades mecánicas de los materiales. Sin embargo, se han formulado ecuaciones para el desgaste y se ha estudiado el desgaste por adherencia que se define como el proceso que produce pérdida de metal entre superficies que interactúan como resultado de la adherencia entre asperezas.

Tomlinson (1929) dedujo que el desgaste es inversamente proporcional al esfuerzo de fluencia del metal. De esta deducción tomó base **Holm (1946)** y propuso una ecuación que establece que a medida comienza el deslizamiento, el contacto entre átomos elimina a los átomos superficiales en los encuentros favorables, de manera que la pérdida de volumen V para una distancia de deslizamiento S viene dado por:

$$\frac{V}{S} = \beta \frac{F}{\sigma_y} = \beta A_t \quad (1.10)$$

donde:

β es el número de átomos que se eliminan por encuentro,

F es la carga aplicada,

V/S es la razón de volumen desgastado,

σ_y es el esfuerzo de fluencia, y

A_t es el área real de contacto.

El término V/S es la razón de volumen desgastado por unidad de distancia deslizada y se observa que es inversamente proporcional al esfuerzo de fluencia, lo cual se puede observar una similitud en la Ec. (1.8).

La Ec. (1.10) establece que el volumen total de material eliminado por deslizamiento es proporcional a la carga normal aplicada y a la distancia de deslizamiento e inversamente proporcional al esfuerzo de fluencia.

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

Se han realizado ensayos para determinar la razón de desgaste, haciendo correr espigas cónicas de latón y de acero sobre discos de acero, al graficar diferentes puntos del volumen de metal eliminado contra distancia de deslizamiento, se observa un período inicial de acoplamiento seguido por un estado estacionario de desgaste, como se puede observar en la Figura 1.3.

A partir de la Figura 1.3 **Burwell y Strang (1952)** dedujeron la ecuación siguiente:

$$h = \beta \frac{\sigma_a}{\sigma_y} S \quad (1.11)$$

donde:

h es la altura perdida debido al desgaste,

σ_a es la presión de contacto aparente ejercida por la espiga sobre el disco,

β es la probabilidad de producir un fragmento por desgasten en un encuentro,

σ_y es el esfuerzo de fluencia, y
 S es la distancia de deslizamiento.

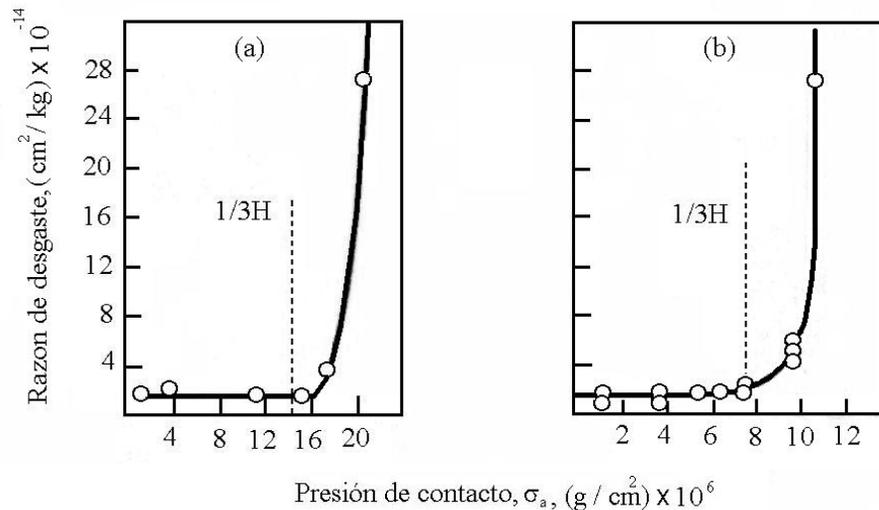


Figura 1.3. Razón de desgaste vs presión de contacto aparente (Burwell y Strang, 1952).

En esta ecuación se representa la pérdida de altura de la espiga debido al desgaste, **Burwell y Strang (1952)** graficaron la razón de desgaste expresada como $h/\sigma_a S$ vs σ_a , registrando que para una presión de contacto (σ_a), ésta es equivalente a la tercera parte de la dureza de la espiga; por lo tanto, se obtiene un considerable aumento en el valor de la razón de desgaste.

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

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

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

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

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

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

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

Realizando algunas sustituciones en la Ec. (1.10) se obtiene:

$$\frac{V}{S} = \left[A_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \frac{d}{v \xi^2 \rho^2} \right] \frac{F}{\sigma_y} \quad (1.12)$$

donde: β se expresa mediante la Ec. (1.13), así:

$$\beta = A_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \frac{d}{v \xi^2 \rho^2} \quad (1.13)$$

donde:

A_0 es la constante de Arrhenius,

R es la constante universal de los gases,

T es la temperatura absoluta de la superficie deslizante,

d es el diámetro del área de contacto,

v : velocidad de deslizamiento,

ξ es el espesor crítico de óxido, y

ρ es la densidad de la capa de óxido.

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

Rowe (1966) realizó una modificación a la ecuación para el desgaste por adherencia que presentó **Holm (1946)** la cual fue incorporar un factor α que toma en consideración la presencia de contaminantes superficiales, el cual se define matemáticamente como $\alpha = A_t / A$ donde A_t y A son las áreas reales y aparentes de contacto respectivamente. Esta relación tiene un valor entre cero y la unidad, por lo tanto la ecuación modificada para el volumen de material eliminado V que corresponde a una distancia de deslizamiento S es:

$$V = \alpha \beta A_t S \quad (1.14)$$

De la ecuación anterior se puede deducir que para cuando A_t es cero, no existirá desgaste pero para que α sea la unidad, el área aparente debe ser igual al área total de las uniones.

1.2.3. DESGASTE POR ABRASIÓN

El desgaste abrasivo puede definirse como el desgaste que ocurre a temperaturas normales (temperatura ambiente) como resultado del contacto dinámico entre superficies metálicas desgastadas y partículas o fragmentos abrasivos. El desgaste por abrasión puede dividirse en tres categorías: 1) abrasivo penetrante, 2) de alto esfuerzo o abrasión pulverizante y 3) abrasión

ligera, de bajo esfuerzo por rayado o por erosión. Así, las tres categorías se pueden presentar simultáneamente en una pieza desgastada.

El tipo de desgaste penetrante se caracteriza por altos esfuerzos (generalmente causados por impacto) y da como resultado una considerable micro deformación de la superficie, una característica muy importante de este tipo de desgaste, es que el abrasivo el cual suele tener un buen apoyo y su acción penetrante puede compararse a una herramienta de corte. Las tasas de desgaste abrasivo generalmente se expresan en términos de milésimas por hora, que representa la velocidad normal a la que el metal se elimina de la superficie del material.

El tipo de abrasión pulverizante ocurre cuando dos superficies se frotan entre sí en un medio arenoso con suficiente fuerza para producir trituración en las partículas de mineral o en otros abrasivos atrapados entre las dos superficies. El deterioro ocurre por rayado, por flujo plástico local y agrietamiento microscópico. Por lo tanto, aun cuando la abrasión originalmente observada entre las superficies puede ser bien suave de inmediato se convierte en una abrasión destructiva.

Los principales factores que ocasionan desgaste por erosión son la velocidad y el bajo impacto cuando el movimiento es paralelo a la superficie. Por lo común este desgaste depende de la dureza de las partículas y en muchas ocasiones también de los filos que éstas presentan.

Cuando un cuerpo de alta dureza se desliza sobre otro de menor dureza, si se aplica un esfuerzo normal se puede notar una serie de surcos lo que se conoce como desgaste por abrasión de dos materiales.

Bowden y Tabor (1964) demostraron que durante el hundimiento, el volumen total del surco marcado por cm de deslizamiento es $F/2\sigma_y$, donde F es la carga normal aplicada, por lo tanto la resistencia al desgaste por abrasión viene dado por:

$$R = \frac{2 \sigma_y}{F} \quad (1.15)$$

Esta ecuación indica que mientras uno de los materiales tenga mayor dureza, más resistente será la abrasión.

En muchas ocasiones el residuo del desgaste atrapado, raya las superficies deslizantes de las máquinas, aunque también se supone que reduce el desgaste. Si bien la fricción se expresa como la suma de las resistencias al corte del número de uniones formadas con la carga normal, no se puede afirmar que la ruptura de los puntos de contacto simultáneamente produzca la formación de residuos de desgaste.

A medida se aplica una carga, se forman uniones por flujo plástico. Las áreas que están en contacto entre las superficies no son iguales debido a que el tamaño de cualquier unión es diferente de otra que se encuentre cerca de ella. Mientras más pequeñas sean las uniones son más numerosas pero aumentan en tamaño al incrementarse la carga normal, o posiblemente por el resultado de una fuerza tangencial.

1.2.4. TRANSFERENCIA METÁLICA DURANTE EL DESGASTE

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

Los estudios cuantitativos de la transferencia de metal se han llevado a cabo mediante técnicas de rastreo con un estilete radioactivo en las que una espiga radiada se desliza sobre una superficie no radiada y la cantidad de metal que se transfiere se registra por medio de un contador **Géiser-Muller** unido a la

máquina de desgaste. En la Figura 1.4 se presenta que el primer efecto del deslizamiento es que la espiga se desgaste con mayor rapidez, sin embargo, se llega a una etapa en que la cantidad de metal transferido alcanza un valor constante cuando la rapidez de desgaste llega al estado estacionario.

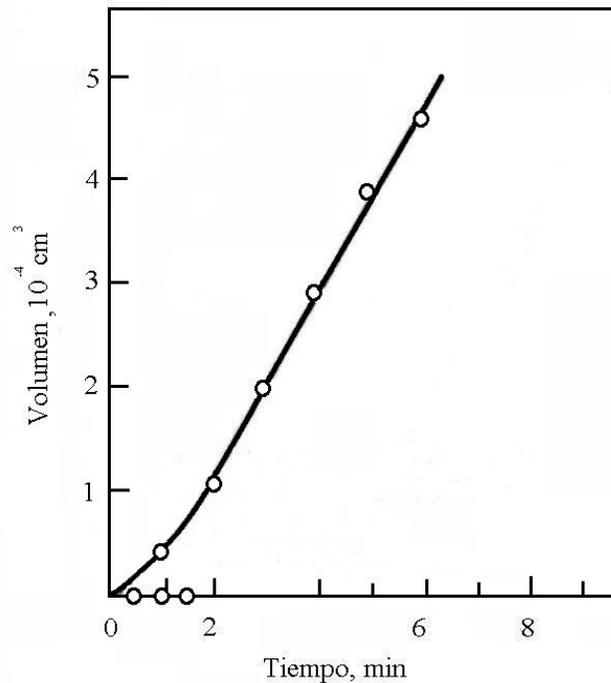


Figura 1.4. Variación entre el tiempo de desgaste y la transferencia de metal de una espiga de latón que se desliza sobre un anillo de estelita.

El deslizamiento continuo resulta en un incremento del tamaño de los fragmentos y en la rugosidad de las superficies; es decir, el metal se transfiere en forma de partículas discretas. Así, según **Kerridge y Lancaster (1956)** un fragmento de desgaste que se desprende de las superficies es aproximadamente ocho veces el área de la partícula transferida y seis veces su espesor.

1.3. VARIABLES QUE AFECTAN EL PROCESO DE DESGASTE

La complejidad en el estudio del desgaste se acentúa al considerar el número de factores necesarios para describirlo. Los principales factores que intervienen en el desgaste pueden enumerarse en la forma siguiente:

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

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

1.3.1. EFECTO DE LA TEMPERATURA Y LA VELOCIDAD

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

relativamente frío. Un incremento en la carga o en la velocidad de deslizamiento aumenta la temperatura de las uniones y, en casos extremos, puede causar fusión incipiente.

No hay 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.

Lancaster (1957) 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 (Figura 1.5), y al sobrepasar el valor máximo se tiene una caída en la razón de desgaste del latón. En la Figura 1.5 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 (Figura 1.5) presenta 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.

A cualquier temperatura, hay 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.

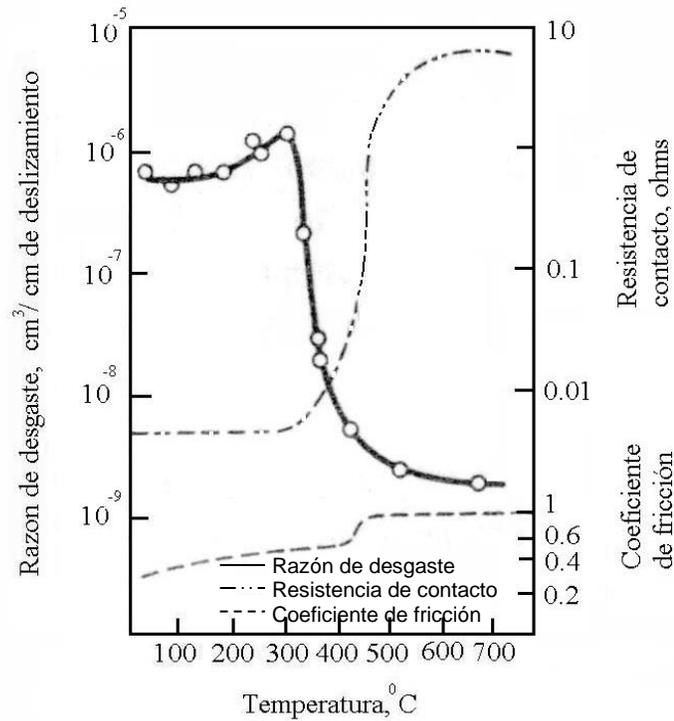


Figura 1.5. Variación de la razón del desgaste en función de la temperatura para un latón (60/40), sobre acero para herramientas.

Hughes y Spurr (1955) han efectuado deslizamiento de espigas de acero sobre discos de hierro colado en un intervalo de velocidades de 100 – 500 cm/s y con cargas variables entre 0.8 – 3 kg. Al incrementar la carga y la velocidad, aumenta la temperatura disminuyendo en consecuencia la dureza de la espiga. Se logró medir la dureza de acero a la temperatura resultante determinada por una combinación particular de carga y velocidad. Si ahora la razón de desgaste se grafica contra el recíproco de la dureza medida, se obtiene una relación lineal, como se presenta en la Figura 1.6.

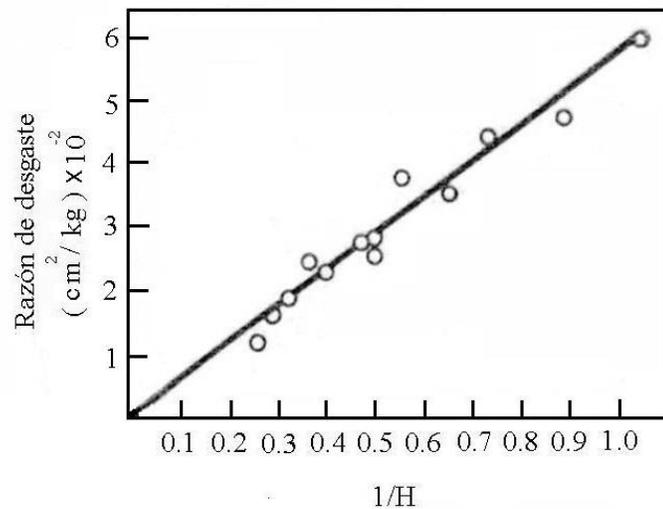


Figura 1.6. Razón de desgaste en relación con el recíproco de la dureza.

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, generando un aumento en la razón de desgaste, lo cual sucede si la temperatura de las superficies en contacto es suficientemente elevada. Además, se sabe que a velocidades muy altas se produce la fusión de las superficies en contacto, efecto que se acentúa si la temperatura de fusión y la conductividad térmica del metal son bajas.

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 Figura 1.7 se presenta las variaciones de razón de desgaste con una carga de 22.5 kg aplicándole diferentes velocidades y se aprecia un decremento seguido de un incremento en la razón de pérdida de metal cuando se sobrepasa una velocidad aproximada de 100 cm/s. **Hirts y Lancaster (1960)** observaron la razón de transferencia de metal por medio de una técnica de trazadores radiactivos y en la Figura 1.7 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.

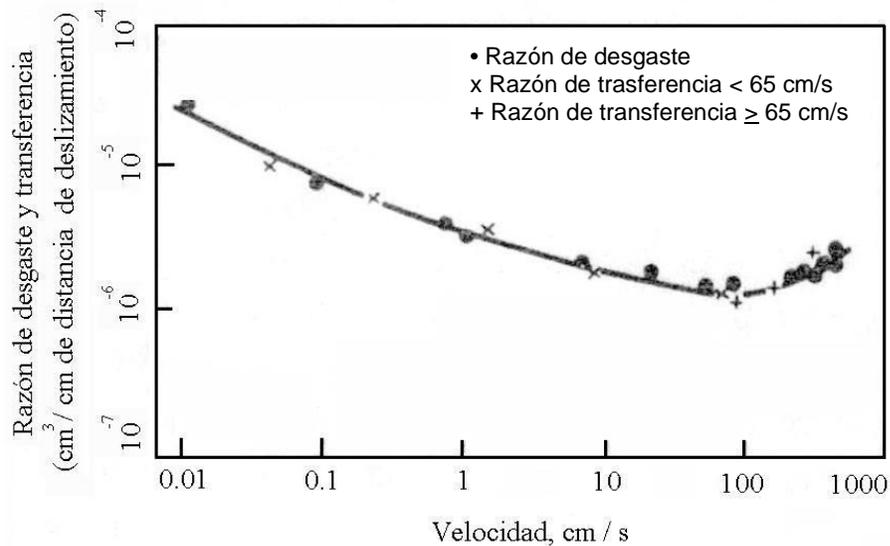


Figura 1.7. Variación de la razón de desgaste y la transferencia de metal con la velocidad, utilizando una carga de 22.5 kg.

Además, en la Figura 1.8 se presenta que la razón de desgaste disminuye, al igual que como se describe en la Figura 1.7 cuando se utilizan espigas enfriada con agua. Contrario a lo anterior, en el caso que la espiga de latón se aísla térmicamente, el desgaste aumento al incrementar la velocidad.

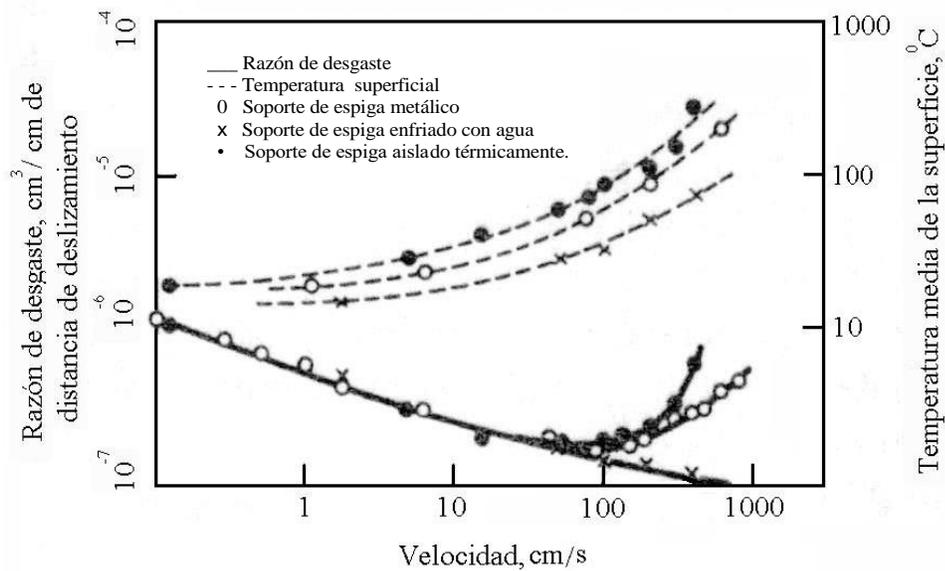


Figura 1.8. Variación de la razón de desgaste y la temperatura superficial vs velocidad para espigas aisladas térmicamente y enfriadas, utilizando una carga de 3 kg.

1.3.2. EFECTO DE LA CARGA Y LA DISTANCIA DE DESLIZAMIENTO

Se ha determinado que el desgaste se incrementa de forma casi proporcional a la carga. Sin embargo, esta relación se pierde con el calor de fricción. Si un metal como el cobre se presiona sobre el acero, cierta cantidad de cobre se transfiere al acero, de esa manera el área de la unión podría estimarse utilizando radiotrazadores. Así, **Rabinowicz (1953)** demostró que la masa (M) de la fracción más grande de residuo podría relacionarse con la carga normal aplicada (F).

$$M = CF^\alpha \tag{1.16}$$

donde:

C es una constante y

α es un exponente, el cual para el cobre sobre un acero tiene un valor de 0.3.

Así la Ec. (1.16) demuestra que la masa del fragmento de desgaste sólo se incrementa a medida aumenta la carga. El mismo estudio se demostró que el efecto predominante de aumentar la carga aplicada fue que aumentara el número de uniones.

Lipson (1960) enunció como regla general que ante esfuerzos inferiores a $1/3$ BHN (aproximadamente en el punto de fluencia), el desgaste será independiente de la carga.

Se ha determinado que la tasa de desgaste es linealmente proporcional a la distancia recorrida. No obstante, los resultados de experimentos obtenidos por **Piggott y Wilman (1957)**, presentado en la Figura 1.9 demuestran que el desgaste se inicia linealmente y después describe una curva exponencial.

En este tipo de experimentos cabe notar dos aspectos:

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

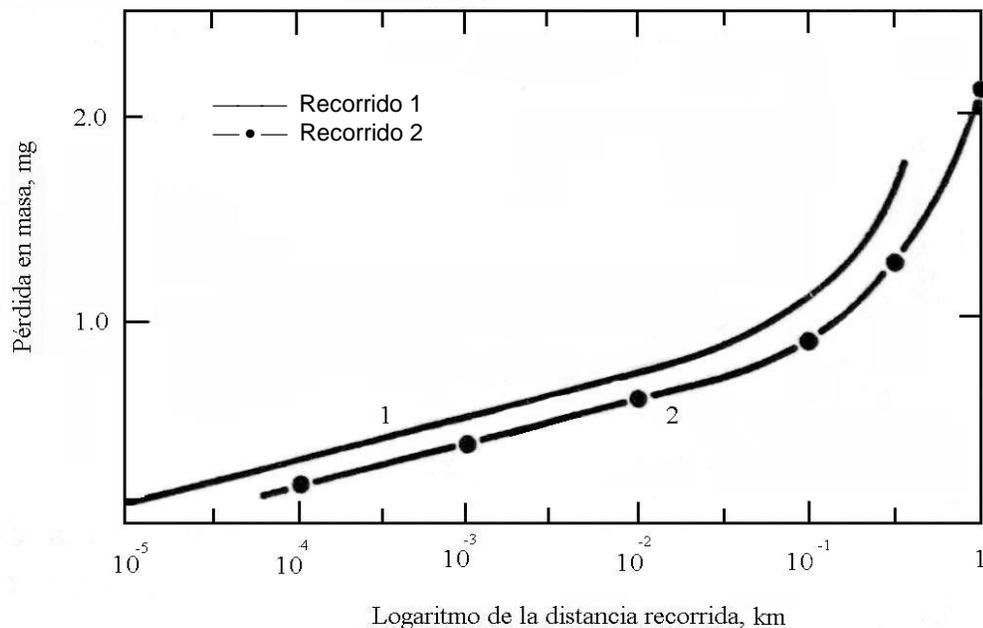


Figura 1.9. Desgaste del acero vs acero a 100 kg/cm^2 y con lubricante líquido parafínico.

1.4. ESTUDIOS DE DESGASTE

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

1.4.1. TIPOS DE MÁQUINAS PARA REALIZAR ENSAYOS DE DESGASTE

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

a) Espiga sobre mesa oscilante (Figura 1.10)

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

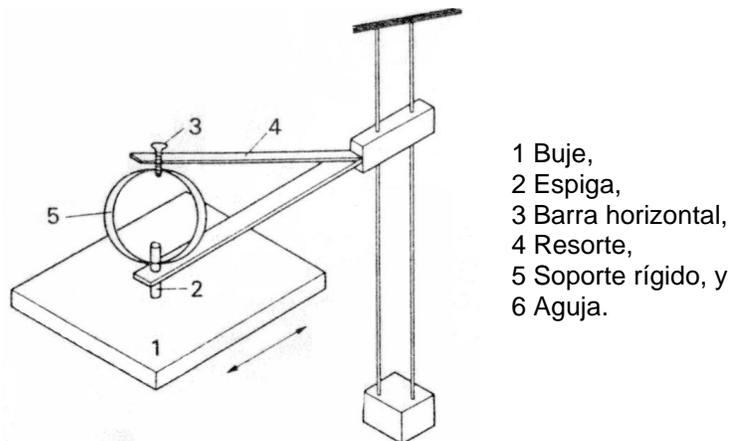


Figura 1.10. Espiga sobre mesa oscilante.

b) Espiga sobre buje (Figura 1.11)

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

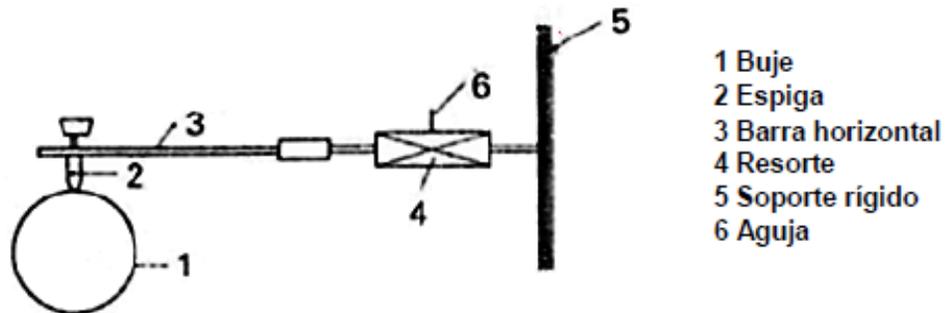


Figura 1.11. Máquina de espiga sobre buje.

c) Cilindros cruzados (Figura 1.12)

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

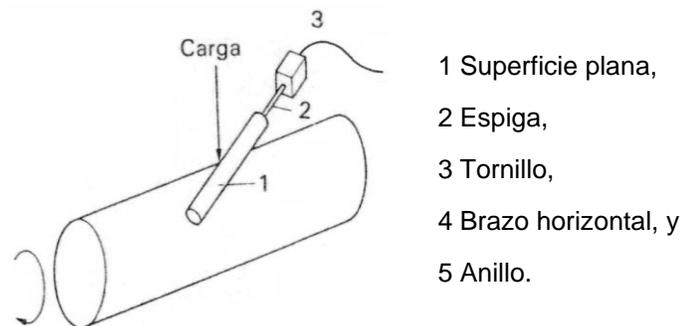


Figura 1.12. Cilindros cruzados.

d) Espiga sobre cilindro (Figura 1. 13)

Esta máquina está constituida por una espiga de geometría cilíndrica o hemisférica que esta acoplada sobre un cilindro, que gira a determinadas rpm. La deflexión de la espiga debida a la fricción se mide por medio de transductores o calibradores de deformación acoplados a la sección reducida.

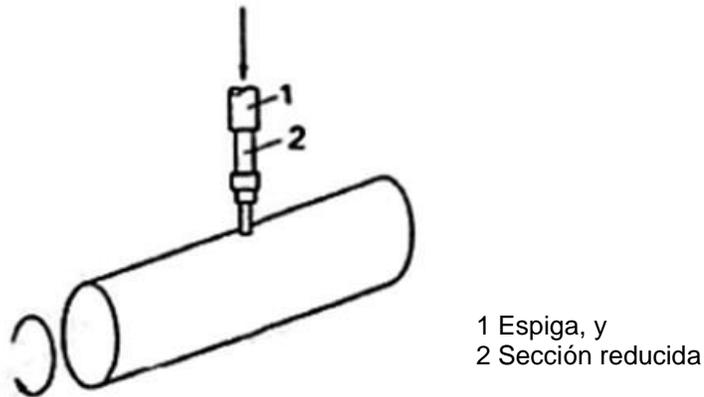


Fig. 1.13. Máquina de espiga sobre cilindro (Sarkar, 1990).

e) Máquina de cuatro bolas

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

f) Máquina de discos

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

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

g) Máquina de espiga sobre disco

Esta máquina se usa para pruebas de desgaste (Figura 1.23), en ella la espiga (1) se coloca perpendicularmente a un disco giratorio (2). Las variables que rigen las pruebas son la carga normal, la velocidad de deslizamiento, la atmósfera y la temperatura ambiente. La cantidad de desgaste puede establecerse pesando la probeta en una balanza analítica.

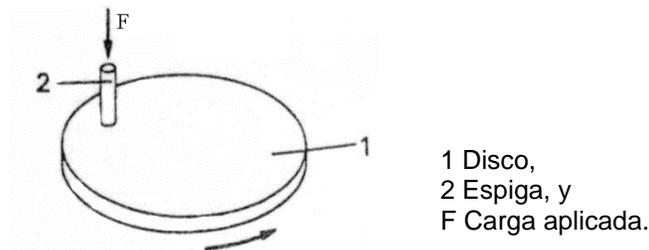


Figura 1.14. Máquina de espiga sobre disco.

Otras máquinas muy comunes en los ensayos de desgaste tipo espiga sobre discos son las que se presentan a continuación:

- Tribómetro CSEM, la cual se presenta en la Figura 1.14.

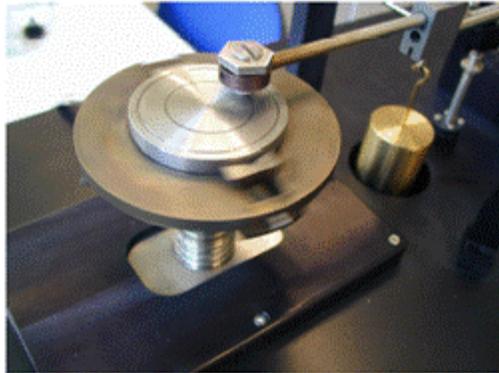


Características:

- ✓ Cargas aplicadas: 1, 2, 5 y 10 N (hasta un máximo de 60 N);
- ✓ Precisión: 10 mN (1 g);
- ✓ Fuerza de fricción: Arriba de 10 N (40 N, opcional);
- ✓ Velocidad de rotación: 0.3 a 500 rpm (1500 rpm opcional);
- ✓ Dimensiones del disco: $r = 60$ mm, $h = 35$ mm ($r = 140$ mm, opcional).

Figura 1.15. Tribómetro CSEM.

- Tribómetro FALEX ISC – 200PC la cual se presenta en la Figura 1.16.



Características:

- ✓ Cargas aplicadas: Arriba de 10 N;
- ✓ Radio de la espiga: 0.0625 a 0.25 pulg;
- ✓ Velocidad de rotación: Arriba de 1800 rpm (400, 800, 1500 rpm opcional); y
- ✓ Dimensiones del disco: Arriba de 2.75 pulg de diámetro.

Figura 1.16. Falex ISC-200PC.

1.4.2. NORMA ASTM PARA ENSAYOS DE DESGASTE

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

Esta norma se encuentra referenciada a los siguientes documentos:

a) Normas de la ASTM:

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

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

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

G 40. Terminología relacionada al desgaste y erosión.

b) Otras Norma.

DIN-50324. Ensayos de fricción y desgaste.

1.4.3. RESUMEN DEL MÉTODO DE ENSAYO

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

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

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

Los resultados de desgaste normalmente son obtenidos realizando los ensayos a distancias de deslizamiento, cargas y velocidades seleccionadas.

Los resultados de desgaste pueden ser graficados como volumen de desgaste versus distancia de deslizamiento utilizando varios especímenes para diferentes distancias de deslizamiento. Dichos gráficos pueden presentar relaciones lineales y no lineales entre volumen de desgaste y la distancia de deslizamiento en ciertas porciones de distancia de deslizamiento recorrida. La causa de dichas diferencias se debe al período de asentamiento y a la transición

entre diferentes regiones de mecanismos dominantes de desgaste. La magnitud de tales períodos no-lineales depende de los limitantes del sistema de la prueba, materiales, y condiciones de la prueba.

1. 5. GENERALIDADES DEL ACERO AISI 4340

El acero AISI 4340 es un acero con alta capacidad de endurecimiento, asociada al cromo-níquel-molibdeno, que se utiliza en la fabricación de diversos componentes mecánicos, cuando se desea una combinación de fuerza media y resistencia a la fractura. El acero AISI 4340 también tiene una alta resistencia a la fatiga.

Su composición química es – C (0.38 – 0.43), Si (0.15 – 0.30), Mn (0.60 hasta 0.80), Cr (0.80 – 1.10), Ni (1.65 a 2.00), Mo (0.20-0.30)

APLICACIONES

Se utiliza en componentes de los sistemas mecánicos, principalmente estructurales, donde haya una uniformidad dureza a lo largo de la sección transversal grandes o pequeñas secciones. Sus principales aplicaciones son: ejes, engranajes, engranajes planetarios, las columnas, las mangas y los cilindros.

FORJA

El acero AISI 4340 debe mantenerse a una temperatura mínima de 900 °C y una máxima de 1220 °C.

TRATAMIENTO TÉRMICO

Recocido: El tratamiento debe realizarse a una temperatura de 850 ° C durante al menos 1 hora por cada 25 mm de espesor. Enfriar lentamente en el horno.

Normalización: El tratamiento debe realizarse a una temperatura de 860 – 880 °C durante al menos 1 hora por cada 25 mm. El aire frío. En casos especiales se puede usar aire forzado.

Temple: austenize de temperatura entre 840 – 870 °C. El calor durante 1 hora por cada 25 mm de espesor y añadir 1 hora adicional por cada 25 mm. Enfriar en

aceite o polímero. El polímero de enfriamiento conduce a un cambio dimensional más pequeño y mejor homogeneidad microestructural.

1.6. GENERALIDADES DEL ELECTRODO AWS E-7018

El electrodo AWS 7018 es de bajo contenido de hidrógeno y resistente a la humedad. Está especialmente diseñado para soldaduras de alta calidad que requieren severos controles radiográficos en toda posición. Su arco suave y la pérdida por salpicaduras son bajos.

Este electrodo es recomendado para trabajos donde se requiere alta calidad radiográfica, particularmente en calderas y cañerías. Sus buenas propiedades físicas son ideales para ser usado en astilleros y unión de piezas sometidas a altos esfuerzos.

Características:

- Resistencia a la tracción - hasta 79.900 psi
- Límite elástico - 67.700 psi
- Elongación de 29.4% mínimo en 2 pulg.
- Todas las posiciones
- Cumple con ANSI / AWS A5.1 y ASME SFA 5.1 E-7018
- Composición química: Si - 0.6%, Fe - Rem%, Mn - 1%, P - 0.021%, C - 0.08%, S - 0.011%

1.7. GENERALIDADES DEL ELECTRODO AWS UTP-65

El electrodo UTP-65 es un acero dúplex (austenítico-ferrítico) especial para trabajos críticos, con excelentes características mecánicas. Posee alta resistencia a la fisuración al soldar metales base de difícil soldabilidad y uniones disímiles entre aceros austeníticos y ferríticos, aceros al manganeso (ASTM A

128 Hadfield) con aceros aleados y no aleados, aceros de alta resistencia, aceros aleados, aceros susceptibles de tratamiento térmico y aceros para herramientas. Ideal para soldar cordones de soldadura en los materiales base citados anteriormente. UTP-65 tiene una gran variedad de aplicaciones en el mantenimiento y reparación, por ejemplo: en máquinas y partes de transmisión (ejes, engranes, cajas), sobre todo en el campo de maquinaria para construcción, donde se le prefiere debido a su aplicación segura y sin problemas.

Características:

- ✓ Se puede usar en todas las posiciones de soldadura,
- ✓ El arco es estable,
- ✓ La escoria se quita fácilmente,
- ✓ El aspecto del cordón es liso sin salpicaduras ni socavaciones, y
- ✓ Endurece con el tiempo.

Propiedades mecánicas:

- ✓ Resistencia a la tracción 800 MPa,
- ✓ Límite elástico 620 MPa, y
- ✓ Alargamiento has 22 %

Composición química:

C - 0.1%, Cr- 29%, Ni – 9%, Mn – 1%, Si -1%, Fe- balance.

1.8. PROCESO DE CALZADOS

El proceso de calzado en cualquier clase de acero es una técnica de blindaje útil y funcional utilizado comúnmente para proteger o mejorar las propiedades superficiales de la pieza.

El acero es un producto muy versátil. Se produce de muchos tamaños y tipos y se aplica en muchos usos, que incluyen los edificios de acero, los paneles automotrices, las señales de tránsito y diferentes piezas de sometidas a grandes cargas como ejes de trasmisión de potencia.

El bajo costo, resistencia y formabilidad del acero son algunas de las razones por las que se usa comúnmente. Desafortunadamente el acero es vulnerable a la corrosión y oxidación, un fenómeno que causa que la superficie adquiera una apariencia desagradable y, que con el paso del tiempo, contribuye a que la pieza falle. Por esta razón es que el acero se protege utilizando técnica en una gran diversidad de métodos, que van desde la formación de aleaciones internas y diferentes tipos de calzados hasta el revestimiento con pinturas y recubrimientos metálicos.

La corrosión es un proceso de ataque electroquímico que, en el caso del acero, oxida al hierro que hay en el acero y causa que éste se vuelva más delgado con el transcurrir del tiempo. La oxidación, o formación de herrumbre, ocurre como resultado de la reacción química que se producen entre el acero y el oxígeno. El oxígeno está presente siempre en el aire o puede estar disuelto en la humedad a la que se expone el acero. Durante el proceso de formación de herrumbre o comúnmente llamado óxido, el acero se consume durante la reacción química entre el oxígeno y el hierro, ya que el hierro se convierte en productos de corrosión, es decir, simplemente regresa a su forma original y de más baja energía de óxido de hierro

En el caso de la mayoría de los productos de acero bajo en carbono, el óxido de hierro (herrumbre) o corrosión que se produce en la superficie no protege porque no forma una película continua y adherente. En lugar de ello, forma escamas, dejando hierro fresco expuesto a la atmósfera, lo que a su vez ocasiona que haya más corrosión. Esta característica del acero es sumamente indeseable tanto desde un punto de vista estético como desde el aspecto de su vida útil

Afortunadamente, se pueden aplicar diversos blindajes o calzados al acero de una manera muy económica para que quede lo suficientemente protegido de la corrosión y desgaste. Y se pueda usar en muchas aplicaciones.

Una técnica de calzado muy común en el acero AISI 4340 es el revestimiento con electrodos AWS UTP-65 y electrodo AWS E-7018, se recomienda el uso de

estos electrodos porque su núcleo tiene una composición química muy parecida a la del acero AISI 4340.

El calzado con estos electrodos son de excelente adhesión y resistencia a la abrasión y a la corrosión.

La protección de la pieza con estos tipos de calzados no se degradan ni se agrietan y al mismo tiempo crean una barrera protectora anti oxidante y lo más importante es el logro en la mejora de las propiedades mecánicas de la pieza calzada.

CALZADO CON ELECTRODO AWS E-7018.

AWS E7018: es un electrodo con polvo de hierro en el revestimiento, de arco suave y estable, permite soldadura limpia, uniforme y con excelentes propiedades mecánicas es muy recomendado para el calzado de piezas.

El calzado con este electrodo es muy común por su fácil aplicación y buen desempeño y sobre todo es una de los calzados más económicos.

En fin, el calzado se puede aplicar al acero de muchas formas de manera muy económica para darle una protección extraordinaria y a largo plazo contra la corrosión y principalmente contra el desgaste. El resultado final es una combinación sin par de la resistencia y versatilidad del acero y de la prolongada vida útil que proporcionan el calzado con electrodo AWS E-7018 en una amplia gama de aplicaciones en la fabricación de ejes de transmisión de potencia, automóviles, aparatos, herramientas etc.

Para lograr un calzado de alta calidad hay que tomar en cuenta el estado de la pieza a calzar, por lo general las piezas que se calzan son piezas usadas que han sufrido desgaste.

El proceso de calzado consta de varios procedimientos que se desarrollan de forma meticulosa para garantizar que dicho proceso sea funcional.

A continuación se describen los pasos a seguir en el proceso de calzado:

LIJADO DE LA PIEZA

El proceso de lijado es necesario pues hay que remover el metal desgastado y al mismo tiempo se limpia la pieza de las impurezas.

CALZADO

El calzado es el blindaje que se coloca a la pieza para protegerla del desgaste, este proceso se logra depositando material de aporte donde la pieza lo requiera este caso en particular se colocara un calzado de 3 milímetros de espesor.

MAQUINADO

El proceso de maquinado incluye la deformación cortante del material, creando una viruta, cuando esta es removida, queda totalmente expuesta a una nueva superficie.

RECTIFICADO

El rectificado es uno de los procesos más importantes a realizar. Este proceso se basa en remover por medio de una herramienta de corte todo el exceso del material sobrante, de tal manera que la pieza terminada tenga las dimensiones deseadas.

2. DISEÑO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe cada paso a seguir en el desarrollo del estudio de desgaste tipo espiga sobre disco, el proceso inició con el maquinado de 27 discos de acero AISI 4340 y 27 pines de acero AISI O1 con un extremo semiesférico. Se continúa con el calzado de 18 probetas, 9 probetas calzadas con electrodo AWS E-7018 y 9 probetas calzadas con electrodo UTP-65. También, se describe el proceso de temple y revenido de las espigas.

Se presentan las condiciones de los ensayos bajo las cuales se realizan los ensayos de desgaste, ensayando a 3 cargas diferentes y 1 distancia de deslizamiento para cada condición de material base y material con calzados.

Finalmente, se describe el proceso de determinación de la dureza en los discos calzados con electrodos AWS E-7018 y electrodo UTP-65 al igual que los discos sin calzado de material base.

2.1. DIAGRAMA DE FLUJO DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

En la Figura 2.1 se presenta el diagrama de flujo de la metodología experimental realizada, siendo importante describir los pasos que se realizaron y su secuencia. Así, como punto de partida se inició con el dimensionamiento de las probetas para posteriormente realizar su respectivo maquinado, luego se establecen los procesos propios de los tratamientos térmicos en el caso de las espigas, 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.

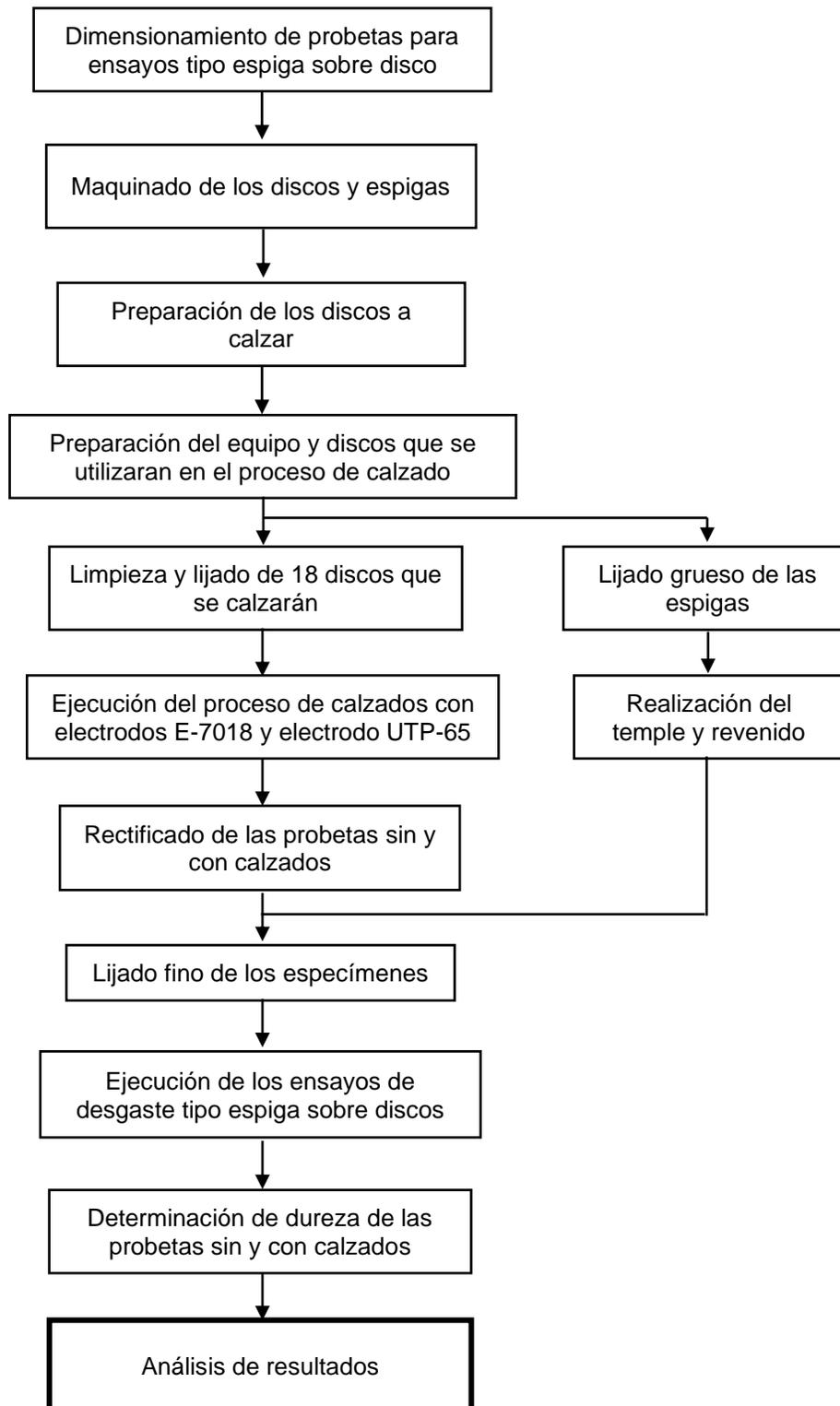


Figura 2.1. Diagrama de flujo del diseño experimental.

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

El dimensionamiento de las probetas se llevó a cabo tomando como referencia el manual del módulo para ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco marca GUNT, modelo TM 260.3. Esta máquina se utiliza con el módulo básico de estudios tribológicos de la misma marca, modelo TM 260.

En la Figura 2.2 se presenta las dimensiones tanto de los discos de acero AISI 4340 y de la espiga de acero AISI O1; los discos tienen un diámetro de 50 mm y un espesor de 10 mm y un agujero de 4.37 mm; dicho agujero permite la sujeción de las probetas en el vaso porta disco, mediante un tornillo. Las espigas tiene un diámetro de 4 mm y 25 mm de longitud con un extremo semiesférico de 2 mm de radio, dichas espigas se acoplan perfectamente en el depósito porta espiga sin necesidad de sujetadores.

Dimensiones de los discos sin y con calzados

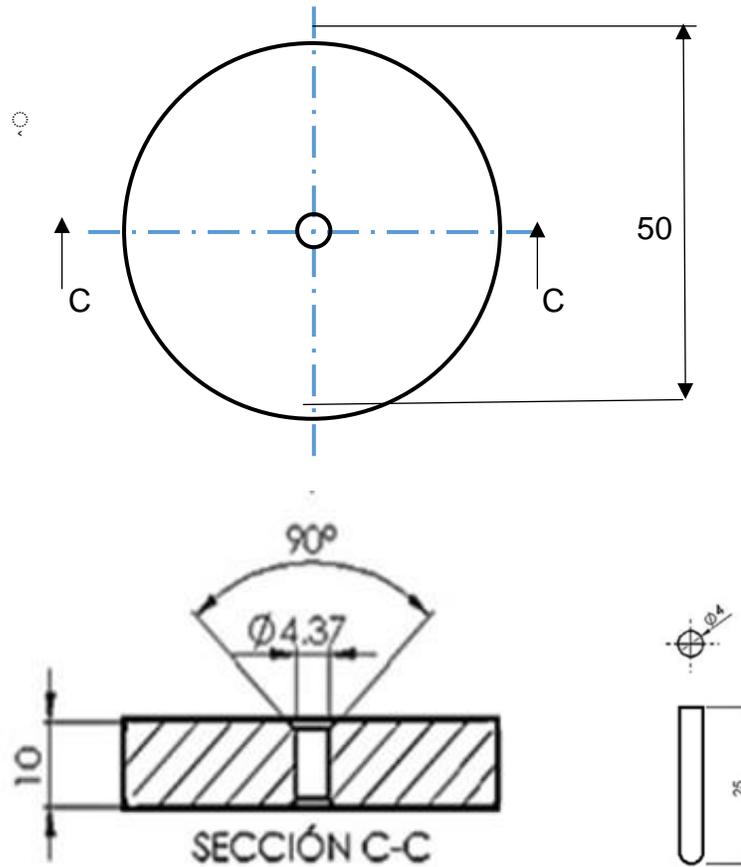


Figura 2.2. Dimensiones de los especímenes. Cotas en mm.

2.3. MAQUINADO DE LAS PROBETAS

Los discos de acero AISI 4340 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) en condición de entrega, respectivamente. Así, las composiciones químicas de cada barra de acero se presentan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Composiciones químicas de los aceros utilizados para la fabricación de los discos y las espigas.

Elementos, %	C	Mn	Si	P	S	Cr	W	V	Ni	Mo
AISI 4340	0.38	0.60	0.15	0.35	0.04	0.70			1.65	0.20
AISI O1	0.95	1.00	0.50	0.03	0.03	0.50	0.50	0.03		

El maquinado de los discos se inició realizando un proceso de cilindrado para obtener el diámetro de 50 mm a partir de los 50.80 mm originales de la barra. Luego, se realizaron cortes transversales mediante una sierra alternante con el fin de obtener discos o especímenes sobredimensionados de 15 mm de espesor (ver Figura 2.3), posteriormente en el torno se refrentan ambas caras de dichos especímenes y luego se perforó un agujero en el centro con una broca de 4.36 mm (11/64 pulg), una vez que cada disco está terminado se colocó en un recipiente con aceite para protegerlos de la corrosión atmosférica.

El maquinado de las probetas se realizó en un torno convencional marca COMEC (ver Figura 2.4), perteneciente al Taller de Mecánica Industrial J.R. BUCHING-CH ubicado en la ciudad de San Miguel.



Figura 2.3. Proceso de corte de los discos: a) etapa de corte y b) discos cortados.



Figura 2.4. Torno convencional marca COMEC.

2.4. PREPARACIÓN DE LAS DISCOS A CALZAR

La técnica que se utilizó para calzar los discos inició con una perforación de 3 mm de profundidad que servirá para depositar el material que actuará como blindaje del material base. Es importante destacar que el calzado de los discos lo realizaron el personal técnico especializado del Taller de Mecánica Industrial J.R. BUCHING-CH, para lo cual se espera un calzados de alta calidad con depósitos de material similares a los realizados a nivel de servicio por dicho taller, Así, los electrodos utilizados fueron el E-7018 y UTP-65 (ver Figura 2.5).

Durante la deposición del calzado en los discos se dejó un tiempo de enfriamiento para cada cordón de soldadura, para no propiciar el calentamiento de los discos, luego se procedió a retirar la escoria y así se repitió el proceso hasta rellenar por completo y luego se refrentó dicha cara calzada en el torno.



Figura 2.5. Electrodo utilizados para el calzado de los discos; a) E-7018 y b) UTP-65.

En la Figura 2.6 se presenta, detalladamente, el proceso de calzado realizado en las probetas de material base de acero AISI 4340. Así, el proceso que se siguió en la preparación de las probetas calzadas consta de las etapas siguientes:

- 1) Corte de discos de 15 mm de espesor
- 2) Realización del depósito de material
- 3) Limpieza de las probetas a calzar
- 4) Ajuste del equipo de soldadura
- 5) Ejecución del proceso de calzado
- 6) Refrentado de la cara calzada.

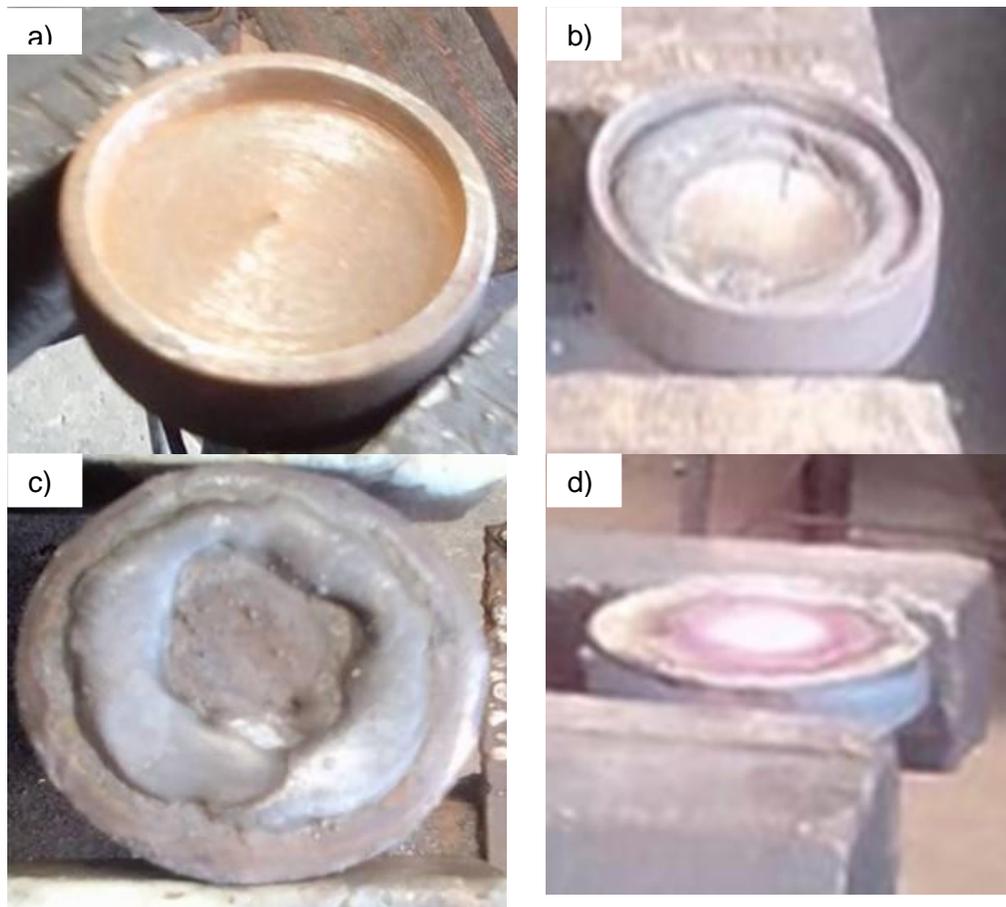


Figura 2.6. Proceso del calzado del metal base: a) disco listo para el depósito del calzado, b) disco con el primer cordón de soldadura, c) disco con el segundo cordón de soldadura y d) disco terminado de calzar.

2.4.1. LIMPIEZA DE PROBETAS

Previo al calzado de las probetas, fue necesario eliminar cualquier tipo de impureza que se encuentre presente en la superficie de las piezas; el primer paso es un lavado con agua y jabón líquido para remover los residuos del aceite en el que estuvieron sumergidos, posteriormente, los especímenes se secaron con aire caliente para propiciar la remoción total de la humedad, luego el proceso que se siguió para asegurar la eliminación de impurezas es un lavado con soda cáustica al 5%, se garantiza la limpieza de la superficie a calzar pues se sabe

que las partículas extrañas o la contaminación son las causantes de que las soldaduras se contaminen.

2.5. RECTIFICADO DE LAS PROBETAS

El rectificado de los discos se realizó en una rectificadora marca ELLIOTT modelo 618 (ver Figura 2.8), perteneciente al Instituto Nacional Isidro Menéndez (INIM), para este proceso se utilizó una piedra TOOL ROOM BLANCO TIPO 1 de $7\frac{1}{2} \times 1\frac{1}{4}$ pulg R.T. 1 89A46K5VA0 (V) a una velocidad de giro de 3,000 rpm.



Figura 2.7. Rueda abrasiva tool room blanco tipo 1 $7\frac{1}{2} \times 1\frac{1}{4}$ R.T. 1 89A46K5VA0 (V).



Figura 2.8. Proceso de rectificado: a) rectificadora y b) probeta montada en la rectificadora.

2.6. MAQUINADO Y TRATAMIENTO TÉRMICO DE LAS ESPIGAS

Las espigas se fabricaron a partir de una barra de acero AISI O1 de 1 m de largo por 12.7 mm (1/2 pulg) de diámetro. Una vez que las espigas se

maquinaron fue necesario realizar un tratamiento térmico de temple y revenido. Esto debido a que la condición de entrega del acero AISI O1 es en estado de recocido.

El temple se realizó desde una temperatura de 800 °C en un medio de enfriamiento de aceite, luego se realizó el revenido a 200 °C y se dejaron enfriar al aire libre. En la Figura 2.9. Se presenta la curva de temperatura vs tiempo, en la cual se esquematiza el tratamiento térmico de temple y revenido de las espigas.

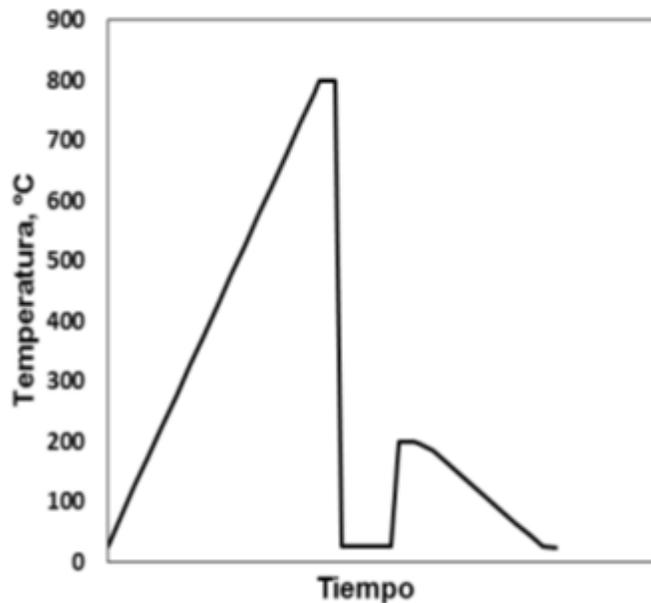


Figura 2.9. Curva de variación temperatura vs tiempo para el tratamiento térmico de temple y revenido de las espigas de acero AISI O1.

Es importante destacar que el tratamiento térmico se realizó en una atmósfera de argón utilizando para este propósito una cámara de gases inertes con el fin de evitar la oxidación de las espigas durante el proceso de temple y revenido, así en la Figura 2.10 se presenta dicha cámara.

El proceso para realizar el tratamiento térmico consistió en precalentar el horno, luego se prosiguió al montaje de la cámara de gas inerte dentro del horno, a una temperatura inicial de 80 °C. Dicho montaje requirió la colocación de la cámara de gases inertes que se colocó en el centro del horno para luego tapar la

parte frontal del horno con fibra cerámica, a modo de confinar la energía térmica dentro del horno y con esto evitar caídas de temperatura y propiciar un ambiente seguro de operación.



Figura 2.10. Cámara de gas inerte durante el tratamiento térmico de las espigas.

Una vez que el equipo se montó adecuadamente, se procedió a introducir las espigas dentro de la cámara.

Al colocar las espigas dentro de la cámara, ésta se cerró. Posteriormente, se realizó el incremento de temperatura de 100 °C cada 30 min, para propiciar de esta manera que la temperatura del interior de la cámara de gas inerte alcance la temperatura ligeramente por debajo a la del horno y se mantenga uniforme.



Figura 2.11. Espigas dispuestas en grupos de 9 piezas listas para realizarles el tratamiento térmico.

El tratamiento térmico de temple y revenido de las 27 espigas se realizó en una sola sesión, para ello se prepararon 3 grupos de 9 espigas cada uno, sujetas con alambre de amarre. La temperatura de austenización para un acero AISI O1 es de 800 °C y el tiempo de mantenimiento para una sección transversal de 20 mm es de 10 min y por lo tanto para una sección de 4 mm el tiempo a la temperatura de mantenimiento corresponde a 2 min y el enfriamiento 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 introducen las espigas dentro de la cámara del horno y luego se hace llegar a una temperatura de 200 °C. El tiempo de mantenimiento a dicha temperatura, de acuerdo a la relación, que para una sección de 20 mm de espesor o diámetro se requiere 1 hora para este tipo de acero, corresponde a 12 min. Así, una vez cumplidos los 12 min las espigas se extraen de la cámara del horno para un enfriamiento al aire libre.

2.7. PREPARACIÓN DE LOS ESPECÍMENES PARA ENSAYO DE DESGASTE TIPO ESPIGA SOBRE DISCO

Previo a la ejecución del ensayo de desgaste tipo espiga sobre disco, tanto las probetas sin y con calzado y las espigas fueron sometidos a un proceso de limpieza.

Para los discos en general, el proceso de limpieza consiste en un lavado con cepillo y jabón líquido quita grasa y luego enjuagados con agua a modo de retirar los residuos del aceite en el que han estado protegidas después del proceso de maquinado y rectificado.

Después del proceso de limpieza correspondiente de los discos se realizó un proceso de lijado manual de las superficies que estarán en contacto durante la realización de los ensayos de desgaste, para los discos sin calzados se escoge cualquiera de las dos caras y se realiza el lijado desde un papel de lija de SiC número 100 basto, luego se utilizan papeles de lija menos bastas (papeles lija número 210, 300, 400, 500 y 600). Posteriormente, el proceso continuó con el lijado fino utilizando papeles lija número 1000 y 1200). En la Figura 2.12, se presenta la superficie de los discos sin y con calzados después del proceso de lijado. El mismo proceso descrito se realizó con los discos calzados, cabe aclarar que en estos discos, la superficie calzada es la que se somete al proceso de lijado.

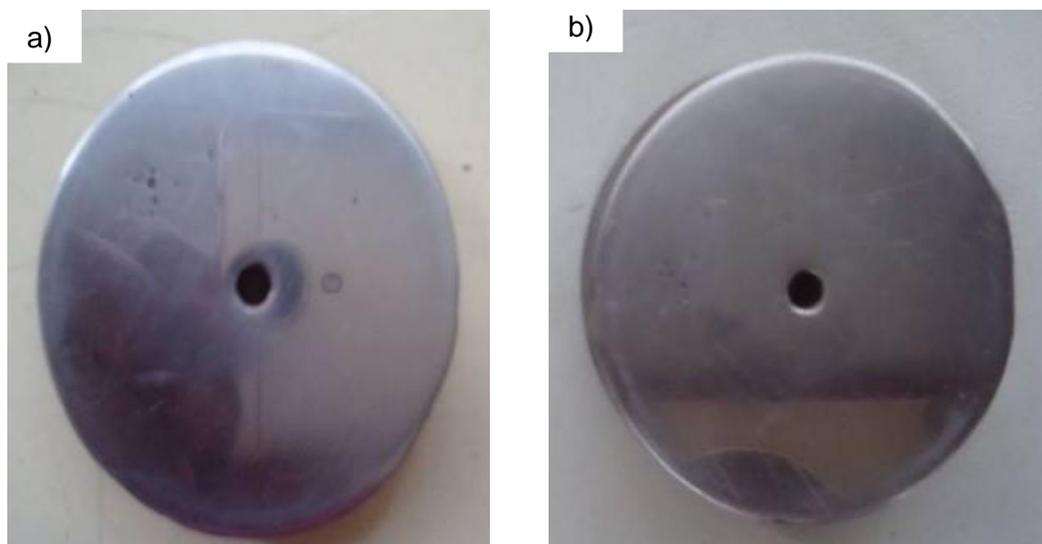


Figura 2.12. Discos sin y con calzados, listos para ser ensayados a desgaste.

Un proceso de lijado igual al anterior, se realizó en el extremo hemisférico de la espiga que se sometieron al ensayo, para dicha sección se utilizan las lijas de SiC más finas (800 y 1000), hasta llegar a la papel de lija final número 1200.

Luego, los discos y las espigas se secaron utilizando aire comprimido, para asegurar el retiro total de la humedad, este proceso se realizó con mayor cuidado en los discos, porque el acero AISI 4340 presenta baja resistencia a la corrosión, a diferencia del acero AISI O1 que presenta una mayor resistencia a la corrosión. Posteriormente, los discos fueron limpiados con alcohol etílico grado 90 y secados con papel absorbente y por último se guardaron en bolsas plásticas con cierre hermético para protegerlos de la corrosión y así se dejan listos para trasladarlos al departamento de investigaciones de metrología ubicado en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, para realizarles la respectiva determinación de masa, antes de realizarles el ensayo de desgaste y posterior al dicho ensayo de desgaste, con el fin de poder determinar la pérdida de masa tanto de los discos como de las espigas.

La determinación de masa de todos los discos y las espigas se hizo con instrumentos de medición del centro de investigaciones de metrología (CIM), tal como se presenta en la Figura 2.15.



Figura 2.13. Instrumentos utilizados para la medición de masa.

2.8. ENSAYO DE DESGASTE TIPO ESPIGA SOBRE DISCO

Los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco se realizaron en una máquina tribológica tipo espiga sobre disco marca GUNT, modelo TM 260.3, la cual es controlada mediante un módulo básico de la misma marca, modelo TM 260, los cuales se encuentran en el laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador (ver Figura 2.14).

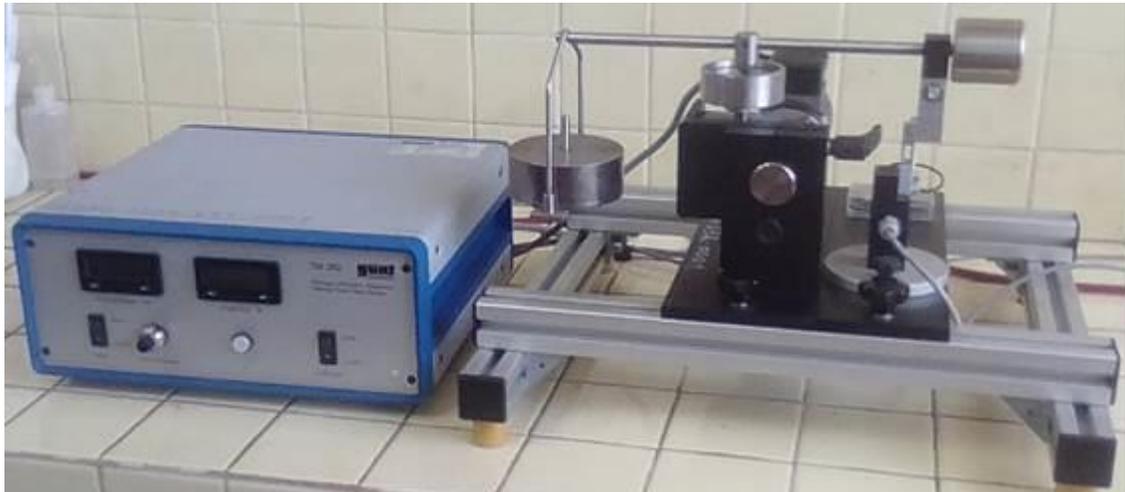


Figura 2.14. Máquina para ensayos tribológicos marca GUNT, modelo TM 260.3

El módulo para ensayos tipo espiga sobre disco permite colocar una espiga con una superficie de contacto (hemisférica) perpendicular a un disco que se sujeta 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, cuya trayectoria es un círculo en la superficie del disco. La espiga se coloca sobre el disco y se aplica una carga constante por medio de un brazo al cual se le agregan pesos, así en la Figura 2.15 se presenta un esquema del módulo para ensayos tipo espiga sobre disco en el que se listan sus componentes más importantes.

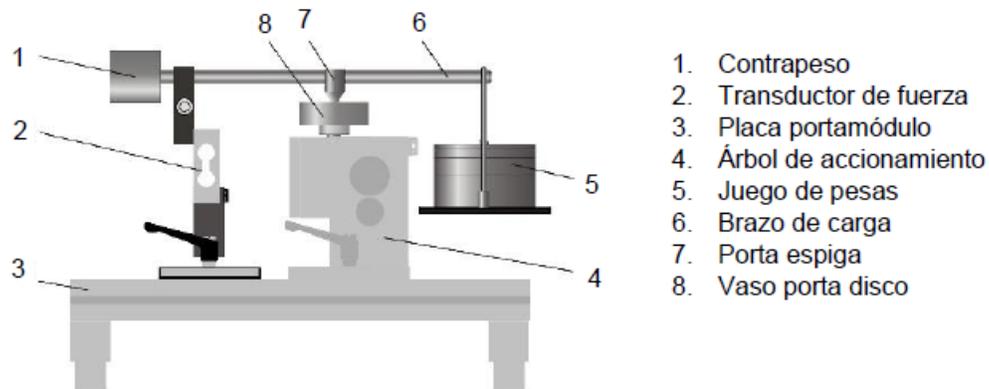


Figura 2.15. Módulo para ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco.

Los resultados de los ensayos de desgaste se presentaran como la pérdida de masa en gramos para ambos especímenes. La cantidad de pérdida de masa se realiza por la diferencia de las masas determinadas antes y después de los ensayos de desgaste, en los especímenes en una balanza analítica ubicada en el departamento de investigaciones de metrología de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de esta universidad (ver Figura 2.13 b).

Los ensayos de desgaste para las diferentes condiciones experimentales para los discos sin y con calzados se realizaron a velocidad constante, igual distancia recorrida y tres diferentes cargas, tal como se presenta en la Tabla 2.3. Siendo importante destacar que se realizarán 3 ensayos de desgaste para cada condición de ensayo.

Tabla 2.2. Condiciones y variables bajo las que se harán los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco.

Condición	Variables		
	Velocidad, m/s	Distancia de deslizamiento, m	Carga, N
Acero AISI 4340 sin calzado	0.05	1000	15
			20
			25
Acero AISI 4340 calzado con electrodo E-7018	0.05	1000	15
			20
			25
Acero AISI 4340 calzado con electrodo UTP-65	0.05	1000	15
			20
			25

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

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

donde:

ω es la velocidad angular en rad/s,

v es la velocidad lineal en m/s, y

r es el radio de la trayectoria de deslizamiento en m.

El diámetro de la trayectoria de deslizamiento se obtiene realizando una medición en el disco de prueba que incluye el módulo de ensayos tipo espiga sobre disco, en dicho espécimen se realizaron dos mediciones, la del diámetro interno de la huella y la del diámetro externo, cuyos valores fueron 4.06 y 4.26 cm, respectivamente. Así, a partir de ambos valores se obtuvo el diámetro intermedio de la huella de desgaste, el cual es el valor medio correspondiente a 4.16 cm. Por lo tanto, sustituyendo en la Ec. 2.1 se obtiene un valor de 2.40 rad/s, y al convertirlo en revoluciones por minuto se tienen 22.96 rpm, el cual se aproxima a 23 rpm.

Debido a que el módulo para ensayos tipo espiga sobre disco no puede controlar la distancia de deslizamiento directamente, durante la ejecución de los experimentos se llevó un registro de tiempos en forma externa, el cual es equivalente a la distancia de deslizamiento. Para obtener el tiempo equivalente a una determinada distancia se procedió a dividir la distancia de deslizamiento entre la velocidad lineal tal como se presenta 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 (0.05 m/s) y se trabaja con una distancias de deslizamiento de

1000 m, el tiempo requerido para alcanzar los 1000 m es de 20000 s, convertidos a horas corresponden a 5 h con 33 min.

Una vez establecida la variable de tiempo y cargas se procedió a realizar los ensayos, para esto se colocaron tanto el disco como la espiga en sus respectivos soportes y se baja el brazo de carga de manera que la espiga se apoye en el disco, una vez colocados en sus respectivas posiciones los especímenes se procedió a encender el módulo de mandos y a su vez se enciende el motor luego se ajustan las revoluciones, el paso siguiente es colocar en el porta carga con la combinación de pesas correspondiente a la carga bajo la que se realizará el experimento según la Tabla 2.3. Por último, se posiciona el brazo de carga y se lee el valor de la fuerza de fricción la cual se anota, de esta forma se realizan las lecturas cada minuto con el objetivo de generar una curva para el coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento. Además, 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 aplicada en cada ensayo en N.

2.9. DETERMINACIÓN DE DUREZA

Para este proceso de determinación de la dureza en la superficies de los discos sin y con calzados, se aplicó el ensayo de dureza Rockwell C, el método de determinación de dureza antes descrito es recomendado para la determinar durezas de aceros de media y alta resistencia a la tracción con temple y revenido.

Para la realización de este ensayo se utilizó un durómetro marca RAMS perteneciente a los Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de esta Universidad (ver Figura 2.16).



Figura 2.16. Durómetro marca RAMS.

La dureza del metal se determinó directamente del dial indicador de la máquina, la escala indicadora está graduada en función de la profundidad del penetrador de diamante. Para utilizar la escala C de dureza se aplica una carga total de 150 kg_f y se utiliza un penetrador de diamante y de geometría cónica (ver Figura 2.17). Así, se hacen 5 mediciones de dureza sobre diferentes puntos en la superficie de cada probeta.

Para determinar la dureza de una probeta, ésta 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, esto es de suma importancia para la realización de una medición confiable. Además, la superficie debe de estar libre de óxidos y partículas que puedan perjudicar la medición de dureza.

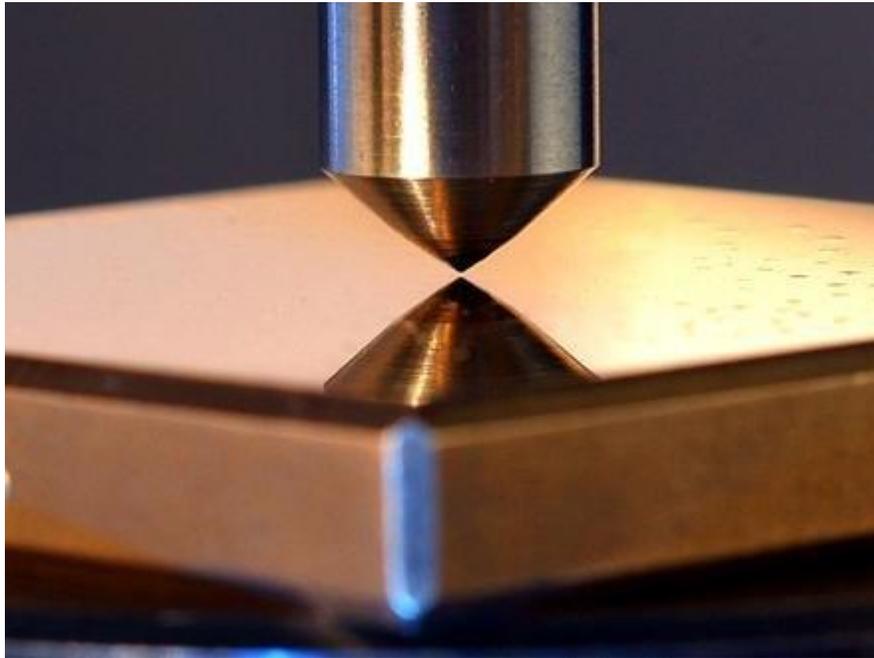


Figura 2.17. Penetrador de diamante de geometría cónica utilizado para la escala de dureza Rockwell C.

Para determinar la dureza de la probeta se procedió a colocarla directamente sobre el porta muestra del durómetro y posteriormente se giró el disco del tornillo de aplicación de carga hasta que la superficie de la probeta hizo contacto con la punta del diamante indentador, posteriormente se continuó girando el tornillo hasta que la aguja indicadora llegó a cero.

Posteriormente se aplicó una precarga de 10 kg_f girando el disco del tornillo a una velocidad constante con el fin de completar 2 vueltas hasta que la aguja coincidió nuevamente con el cero. Después se levantó la palanca de aplicación de carga correspondiente a 140 kg_f , completando así una carga total de 150 kg_f , la palanca se debe mantener en posición vertical durante 5 s hasta

que la aguja se estabilice y finalmente se retiró la carga adicional y se lee el valor de dureza en el dial indicador del durómetro.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta una descripción de los ensayos realizados, los resultados obtenidos en la determinación de la dureza de los discos del acero AISI 4340 sin y con calzados con E-7018 y UTP-65, resultados de los ensayos de desgaste realizados y el análisis de dichos resultados.

Los resultados se presenta mediante tablas y figuras, esto para el valor de dureza, como también para los ensayos tipo espiga sobre disco correspondientes a las diferentes condiciones de los discos a ensayar y a las diferentes combinaciones o parámetros de los ensayos, realizando un análisis estadístico de los datos y haciendo las comparaciones del metal base con los diferentes materiales usados para calzar los discos.

3.1. DETERMINACIÓN DE DUREZA ROCKWELL C

Para la determinación de la dureza de los discos sin y con calzados se tomaron 5 medición en distintas lugares de los discos, dejando una distancia de más de 5 mm entre cada indentación, esto para evitar la interferencia de las zonas endurecidas por dichas indentaciones en la superficie de cada disco. Así, en las Tabla 3.1 a 3.3 se presentan los resultados de las mediciones para cada condición de material.

Tabla 3.1. Medición de HRC para el acero AISI 4340.

N°	Dureza HRC	Promedio, HRC	DE, HRC
1	37	36.6	0.55
2	36		
3	37		
4	36		
5	37		

Tabla 3.2. Medición HRC para la superficie calzada con E-7018.

N°	Dureza HRC	Promedio, HRC	DE, HRC
1	9	11	1.58
2	12		
3	13		
4	11		
5	10		

Tabla 3.3. Medición HRC para el calzado con UTP-65.

N°	Dureza HRC	Promedio, HRC	DE, HRC
1	28	26.6	1.14
2	27		
3	26		
4	27		
5	25		

El valor promedio de dureza para el acero AISI 4340 es 36.6 HRC, con una desviación estándar de 0.55 HRC. El valor promedio de dureza para el calzado con E-7018 es 11 HRC, con una desviación estándar de 1.58 HRC. El valor promedio de dureza para el calzado con UTP-65 es 26.6 HRC, con una desviación estándar de 1.14 HRC.

3.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DESGASTE

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la realización de los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco, estos resultados comprenden las cantidades de desgaste tanto de los discos de acero AISI 4340 sin y con calzado con E-7018 y UTP-65 como también el desgaste de las espigas de acero AISI O1 y las curvas del coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento (ver Figuras 3.1 a 3.12).

Así, se procedió a determinar la masa de los discos y espigas antes y después de cada ensayo, para lo cual se utilizó una balanza electrónica tal como se describió en el capítulo anterior. Para cada espécimen se realizaron 5 mediciones diferentes de masa inicial y final para obtener el promedio. En la Tabla 3.4 se presenta los valores promedio de pérdida de masa de cada disco, especificando los parámetros bajo los que se realizó el ensayo de desgaste; de la misma forma se procedió a determinar la pérdida de masa de las espigas, en la Tabla 3.5 se presenta los datos correspondientes a las espigas.

También, en las Tablas 3.4 y 3.5 y en las Figuras 3.1 - 3.9 se presentan las variables y condiciones bajo las que se realizaron los ensayos de desgaste, para cada condición se realizaron 3 experimentos. En las figuras se presentan el comportamiento de cada ensayo, particularmente la variación del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento correspondiente a cada condición. Así, los resultados fueron obtenidos mediante la toma del valor de la fuerza de fricción durante la realización de cada experimento y posteriormente se procesaron utilizando la Ec. 2.3.

En las Figuras 3.10 - 3.12 se presentan las curvas promedio del coeficiente de fricción de los tres materiales ensayados, con la misma carga e igual distancia de deslizamiento.

Tabla 3.4. Valores de desgastes para los discos sin y con calzado.

Material del disco	Carga	N°	Media peso inicial, g	Media peso final, g	Diferencia de pesos, g
MB	15	1	157.74241	157.72131	0.02117
		2	160.68834	160.66227	0.02608
		3	158.76564	157.76435	0.01599
	20	4	160.00063	159.97353	0.02711
		5	153.75668	153.72937	0.02731
		6	152.23544	151.30972	0.02572
	25	7	151.50296	151.43706	0.26591
		8	159.27433	159.05000	0.22433
		9	157.60738	157.39655	0.21083
E-7018	15	10	149.62128	149.60657	0.02471
		11	147.19324	147.16632	0.02692
		12	150.50837	150.47416	0.03421
	20	13	148.98554	148.88938	0.06616
		14	149.33893	149.30786	0.03107
		15	146.80748	146.74222	0.06526
	25	16	149.36771	149.27115	0.09656
		17	150.10461	150.01015	0.09446
		18	148.76151	148.72381	0.08771
UTP-65	15	19	144.98392	144.96165	0.02227
		20	146.62887	146.60190	0.02697
		21	143.20433	143.17593	0.02841
	20	22	138.58190	138.46271	0.02919
		23	146.28153	146.17996	0.03157
		24	145.62296	145.59230	0.03066
	25	25	146.27278	146.22013	0.05265
		26	145.52863	145.46295	0.06568
		27	140.00216	139.94393	0.05823

Tabla 3.5. Valores de desgastes para las espigas de acero AISI O1.

Material del disco	Carga	N°	Media peso inicial, g	Media peso final, g	Diferencia de pesos, g
MB	15	1	2.32540	2.32342	0.00198
		2	2.35376	2.35086	0.00300
		3	2.37523	2.37265	0.00263
	20	4	2.36981	2.36634	0.00347
		5	2.34482	2.34165	0.00317
		6	2.33273	2.32898	0.00299
	25	7	2.32358	2.31960	0.00398
		8	2.32425	2.29453	0.00397
		9	2.34608	2.30675	0.00360
E-7018	15	10	2.34282	2,34234	0.00048
		11	2.36357	2.36326	0.00031
		12	2.28303	2.28236	0.00067
	20	13	2.36540	2.36198	0.00342
		14	2.36407	2,36011	0.00396
		15	2.82362	2.81956	0.00406
	25	16	2.33290	2.32897	0.00393
		17	2.38085	2.38645	0.00440
		18	2.36783	2.36290	0.00503
UTP-65	15	19	2.35316	2.34480	0.00836
		20	2.35158	2.33633	0.00525
		21	2.35135	2.31293	0.00842
	20	22	2.42306	2.41421	0.02885
		23	2.37954	2.35021	0.02933
		24	2.32240	2.28873	0.03367
	25	25	2.38932	2.38439	0.05493
		26	2.33044	2.27560	0.05484
		27	2.33064	2.29936	0.04128

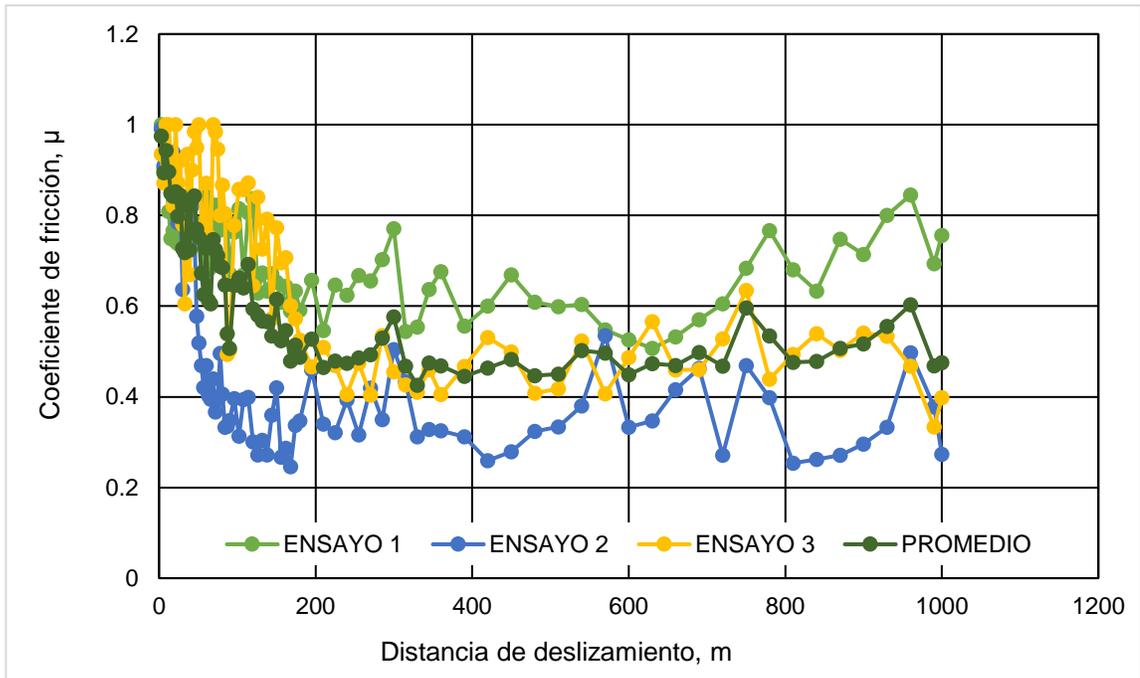


Figura 3.1. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de un acero AISI 4340 y una espiga de acero AISI O1, con carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.

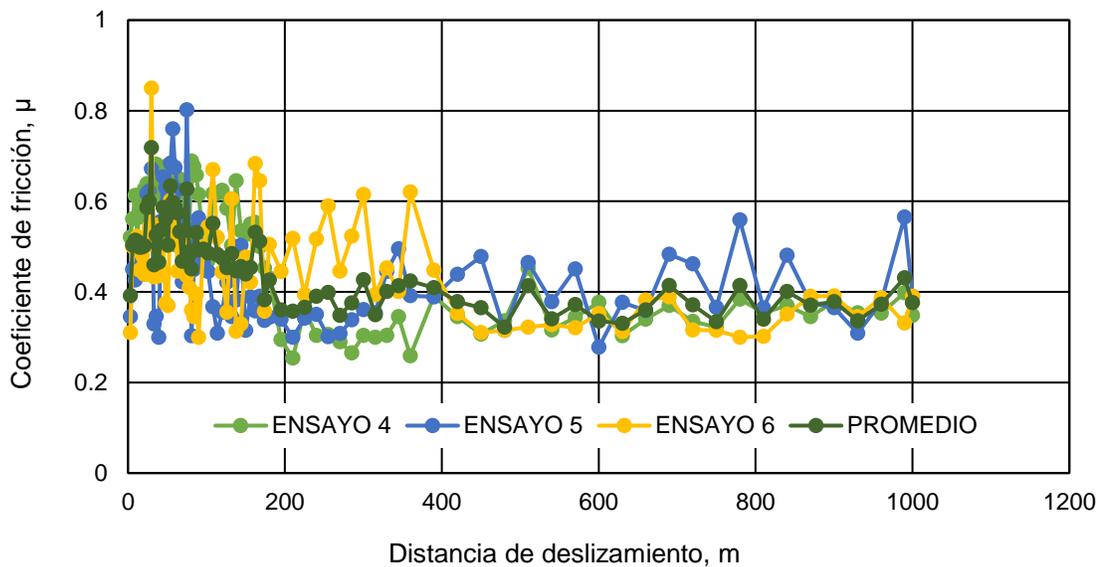


Figura 3.2. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de discos de acero AISI 4340 y una espiga de acero AISI O1, con carga de 20 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.

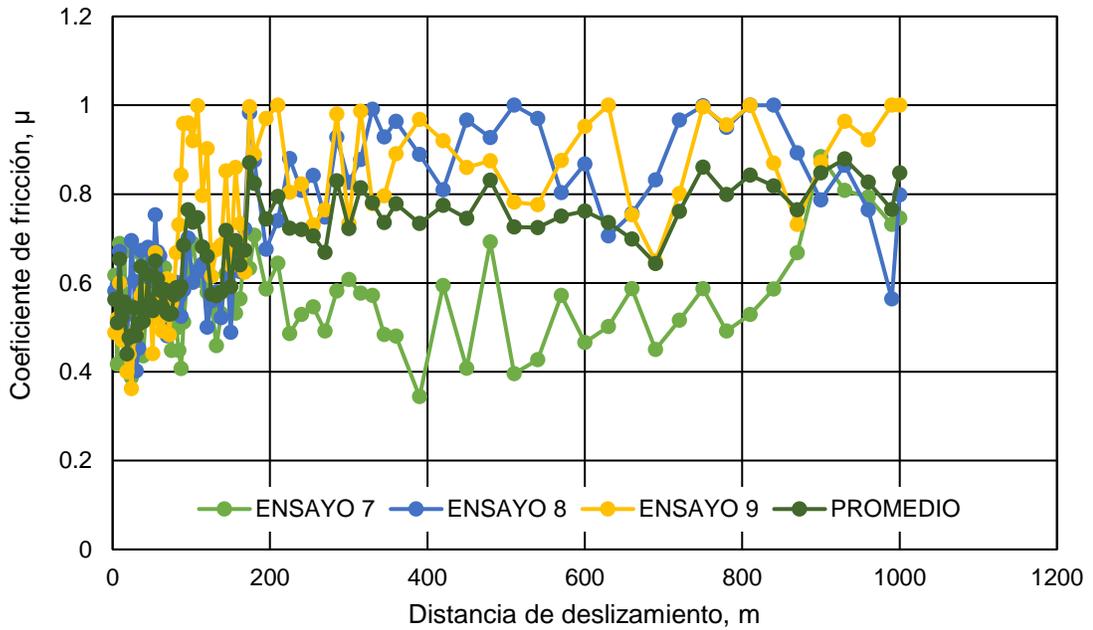


Figura 3.3. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de discos de acero AISI 4340 y una espiga de acero AISI O1, con carga de 25 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.

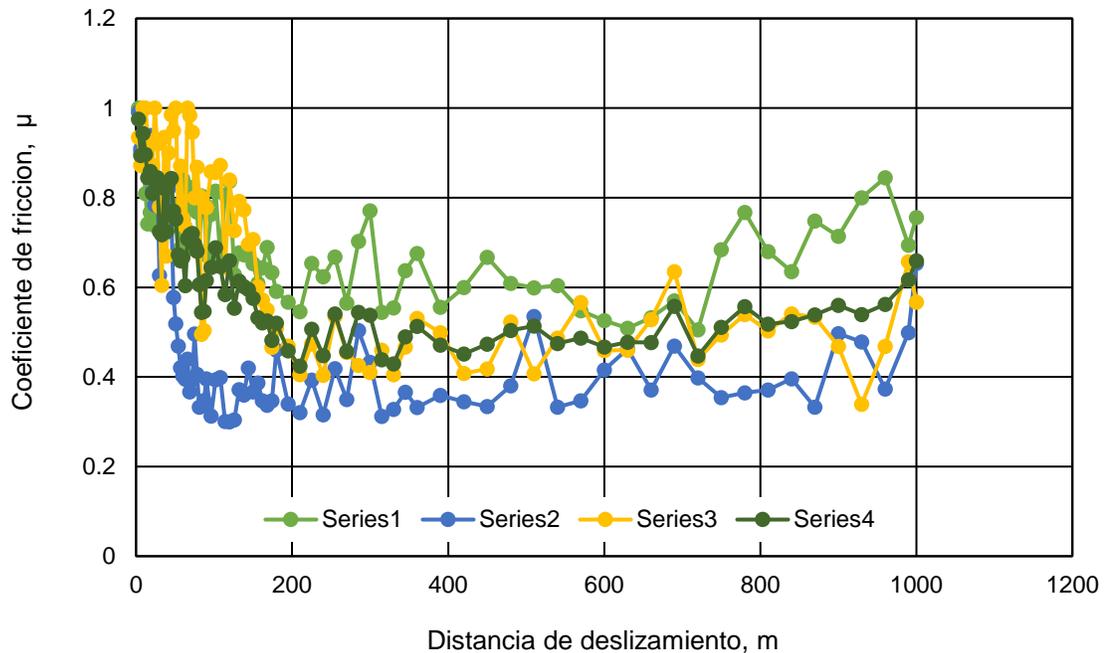


Figura 3.4. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de discos calzados con electrodo E-7018 y una espiga de acero AISI O1, con carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.

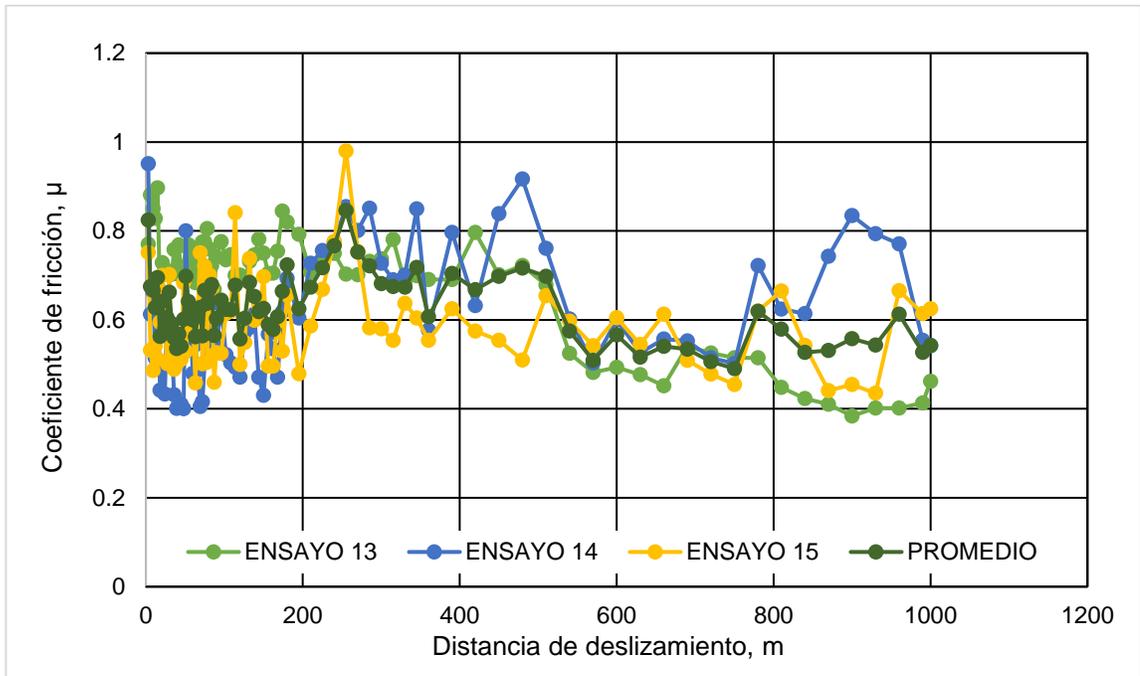


Figura 3.5. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de discos calzados con electrodo E-7018 y una espiga de acero AISI O1, con carga de 20 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.

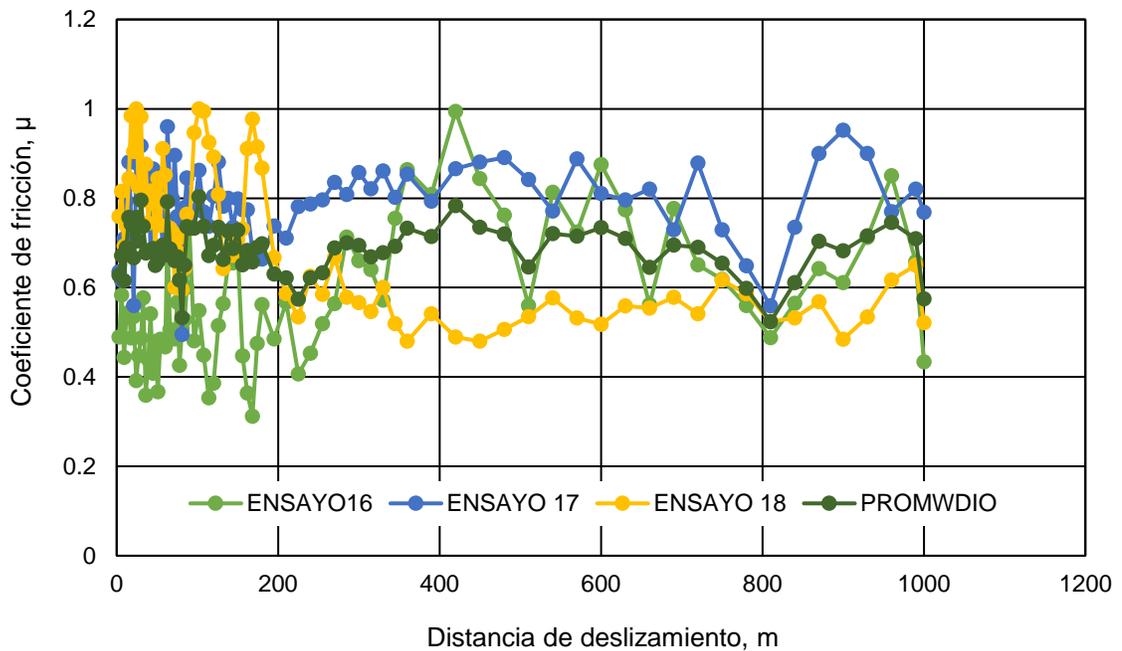


Figura 3.6. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de discos calzados con electrodo E-7018 y una espiga de acero AISI O1, con carga de 25 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.

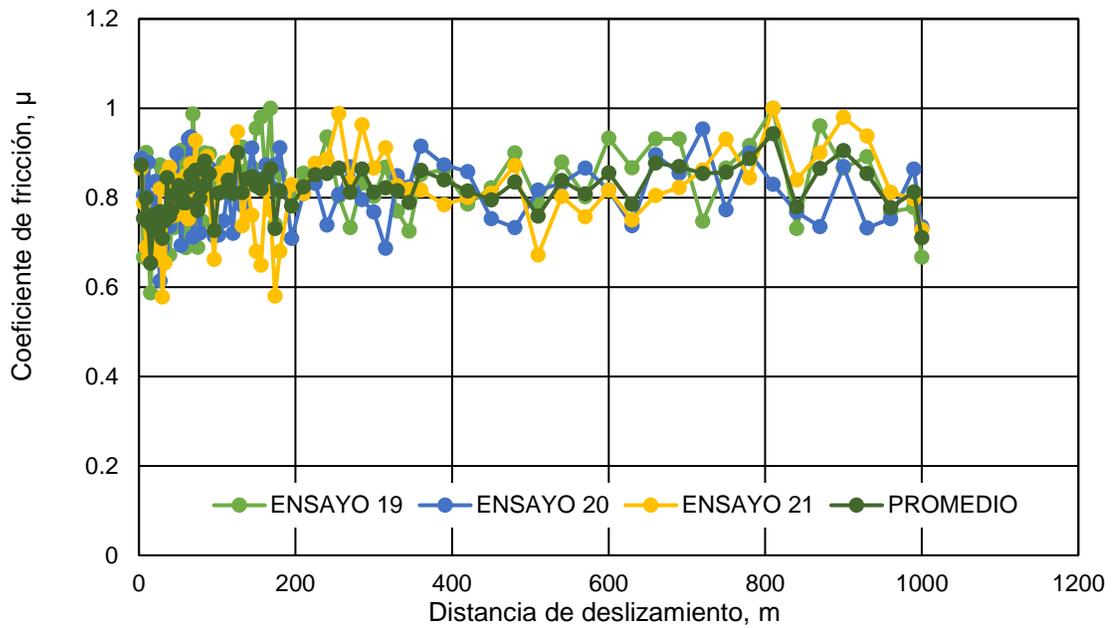


Figura 3.7. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de discos calzados con electrodo UTP-65 y una espiga de acero AISI O1, con carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.

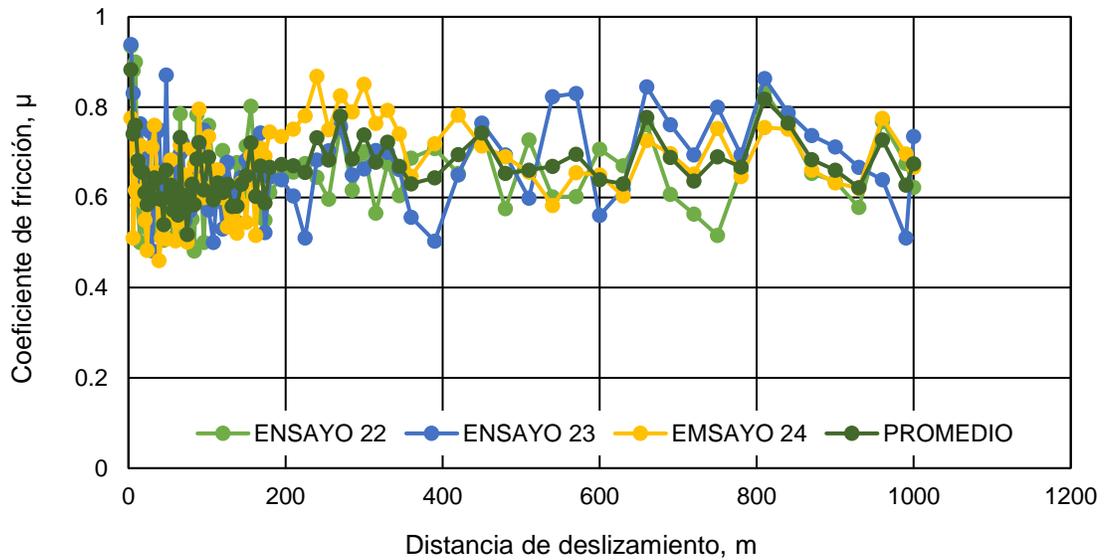


Figura 3.8. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de discos calzados con electrodo UTP-65 y una espiga de acero AISI O1, con carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.

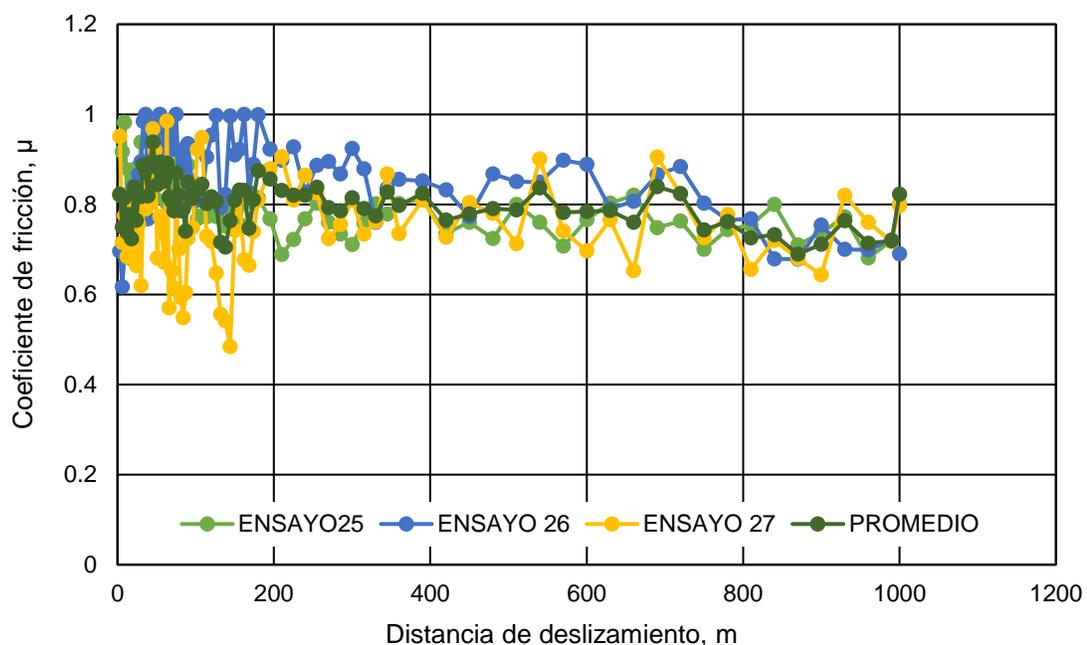


Figura 3.9. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de discos calzados con electrodo UTP-65 y una espiga de acero AISI O1, con carga de 25 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.

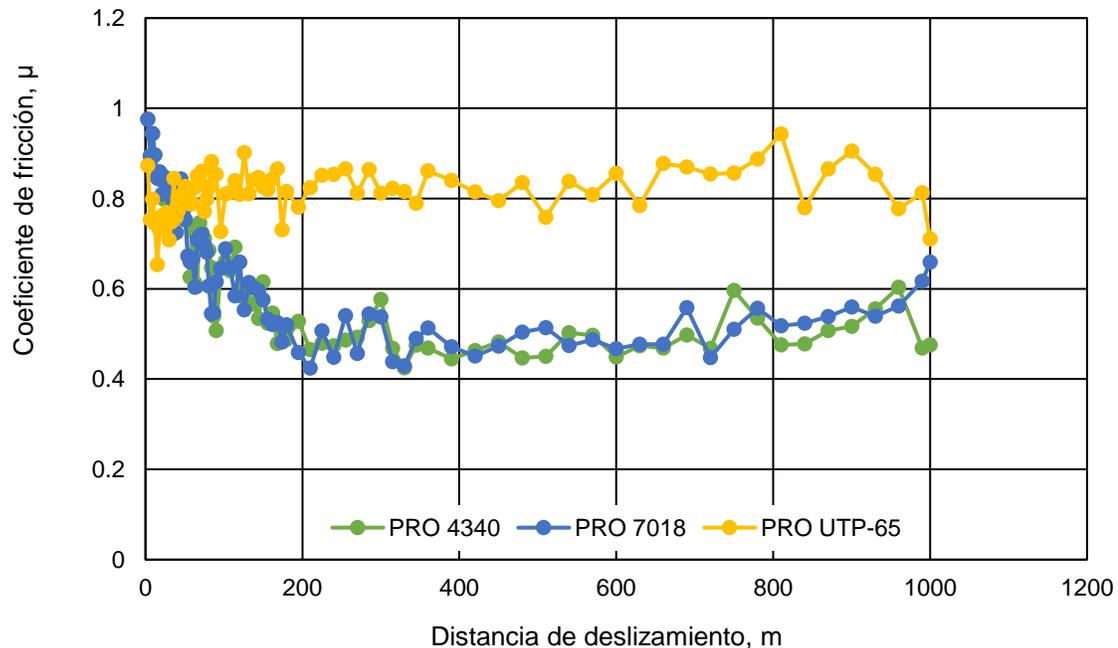


Figura 3.10. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de discos sin y con calzados con E-7018 y UTP-65 y una espiga de acero AISI O1, con carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.

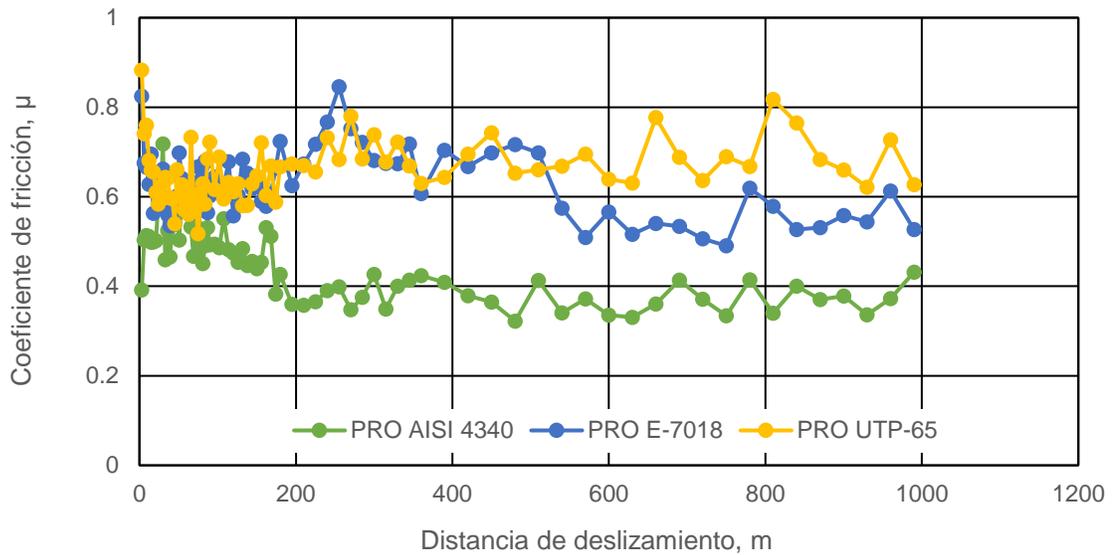


Figura 3.11. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de discos sin y con calzados con E-7018 y UTP-65 y una espiga de acero AISI O1, con carga de 20 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.

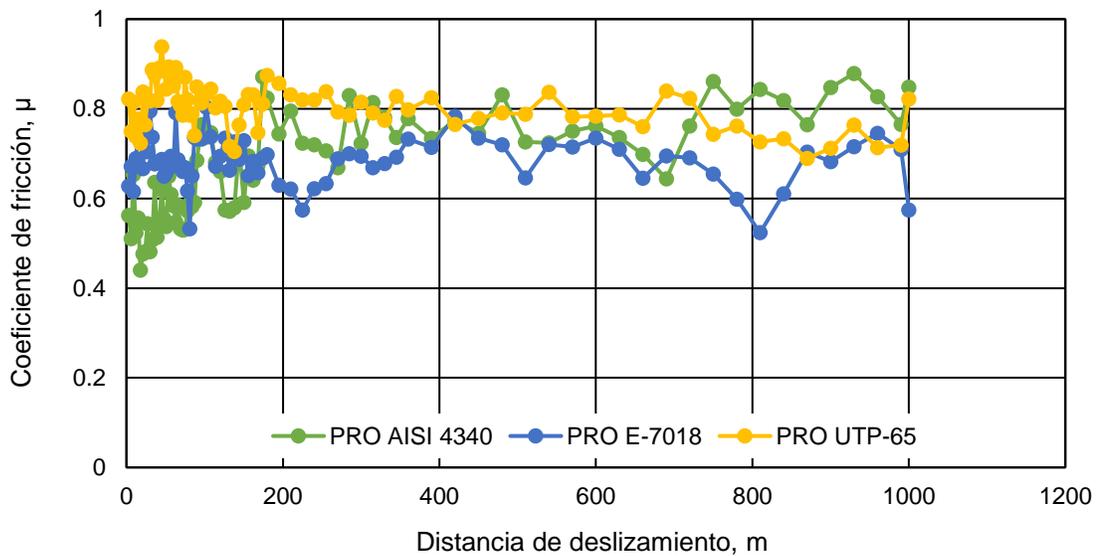


Figura 3.12. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de discos sin y con calzados con E-7018 y UTP-65 y una espiga de acero AISI O1, con carga de 25 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.

3.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Después de obtener y presentar los resultados arrojados mediante los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco y de las mediciones de pérdida de masa de los diferentes especímenes, se procede a realizar el siguiente análisis. Con relación a la dureza de la superficie calzada, se obtuvo un valor promedio de 11 HRC para el calzado con electrodo E-7018 y de 26.5 HRC para el calzado con electrodo UTP-65 con una desviación estándar promedio de 1.58 para el calzado con electrodo E-7018 HRC y una desviación estándar de 1.14 para el calzado con electrodo UTP-65.

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

3.3.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DESGASTE

En las Tablas 3.6 y 3.7 se presentan el análisis estadístico de los valores de desgaste (por diferencia de masa) para los discos y para la espiga.

De estas tablas se puede ver claramente que al incrementar la carga en los diferentes especímenes se produce un aumento de la cantidad de desgaste.

Se puede observar claramente la diferencia del desgaste entre los discos de metal base de acero AISI 4340 sin y con calzados, con respecto al incremento de la carga, se puede apreciar que los discos calzados con electrodo UTP-65 pierden menos masa en comparación con los discos calzados con E-7018 y los discos de MB no así para la espiga de acero AISI O1 que presenta una pérdida de masa mayor que los otros discos para las condiciones de carga de 25 N. En el caso de los discos calzados con electrodo E-7018 se observa que su resistencia al desgaste es menor que la de los discos de MB.

En el mismo sentido, los discos de metal base de acero AISI 4340 presentan un mayor promedio de pérdida de masa en comparación con los otros materiales ensayados, en todas las diferentes combinaciones de carga.

Tabla 3.6. Análisis estadístico del desgaste de los discos determinado a partir de su diferencia de masa.

Material	Carga, N	Media	Varianza X10 ⁻⁵	Des.Est X10 ⁻³	Coef. de variación	Error estándar	Valor mínimo	Valor máximo
AISI 4340	15	0.02108	2.54	5.045	0.239	0.0029	0.01599	0.02608
	20	0.02671	0.70	0.866	0.032	0.0005	0.02572	0.02731
	25	0.23369	8.2	28.7	0.122	0.0165	0.21083	0.26591
E-7818	15	0.02861	2.47	49.7	0.173	0.0028	0.02471	0.03421
	20	0.05416	4.01	20.01	0.369	0.0115	0.03107	0.06316
	25	0.09291	2.13	4.624	0.049	0.0026	0.08771	0.09656
UTP-65	15	0.02588	1.03	3.211	0.124	0.0018	0.02227	0.02841
	20	0.03047	1.44	1.301	0.039	0.0065	0.02969	0.03157
	25	0.05885	4.27	6.53	0.111	0.0037	0.05265	0.06558

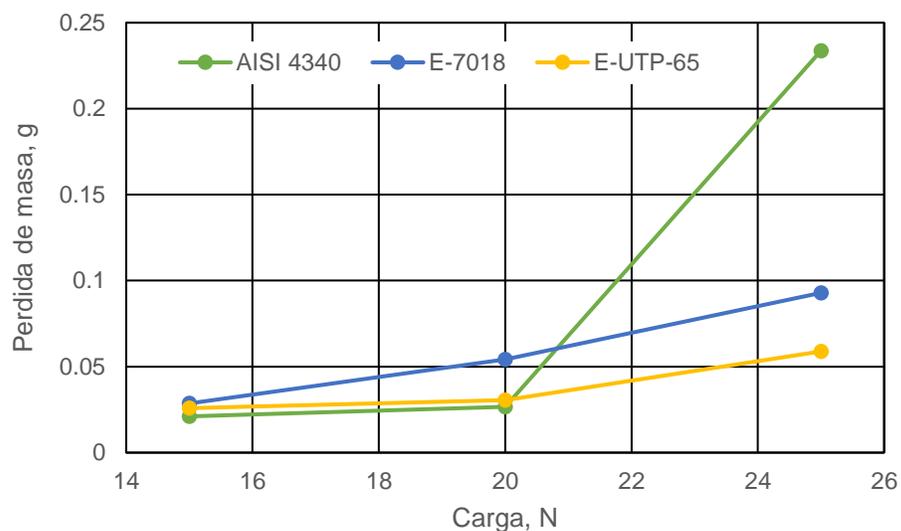


Figura 3.13. Curvas de pérdida de masa de los discos con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de discos sin y con calzados con E-7018 y UTP-65 y una espiga de acero AISI O1, con cargas de 15, 20 y 25 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.

Tabla 3.7. Análisis estadístico del desgaste de las espigas determinado a partir de su diferencia de masa.

Material	Carga, N	Media	Varianza X10 ⁻⁵	Des.Est X10 ⁻³	Coef. de variación	Error estándar	Valor mínimo	Valor máximo
AISI O1 sobre AISI 4340	15 N	0.00253	0.0266	0.516	0.20356	0.00029	0.00198	0.0030
	20 N	0.00254	0.0058	0.242	0.0955	0.00014	0.00299	0.00347
	25 N	0.00385	0.0046	0.216	0.05625	0.000125	0.0036	0.00385
AISI O1 sobre E-7018	15 N	0.00048	0.0324	0.182	0.37005	0.000103	0.00031	0.00067
	20 N	0.00381	0.0185	0.344	0.0928	0.000198	0.00342	0.00406
	25 N	0.00445	0.0304	0.551	0.1239	0.00031	0.00393	0.00503
AISI O1 sobre UTP-65	15 N	0.00734	0.3284	1.813	0.246	0.00104	0.00525	0.00842
	20 N	0.03061	0.7042	2.655	0.0867	0.00153	0.02885	0.03367
	25 N	0.05035	6.170	7.854	0.1560	0.00453	0.04128	0.05493

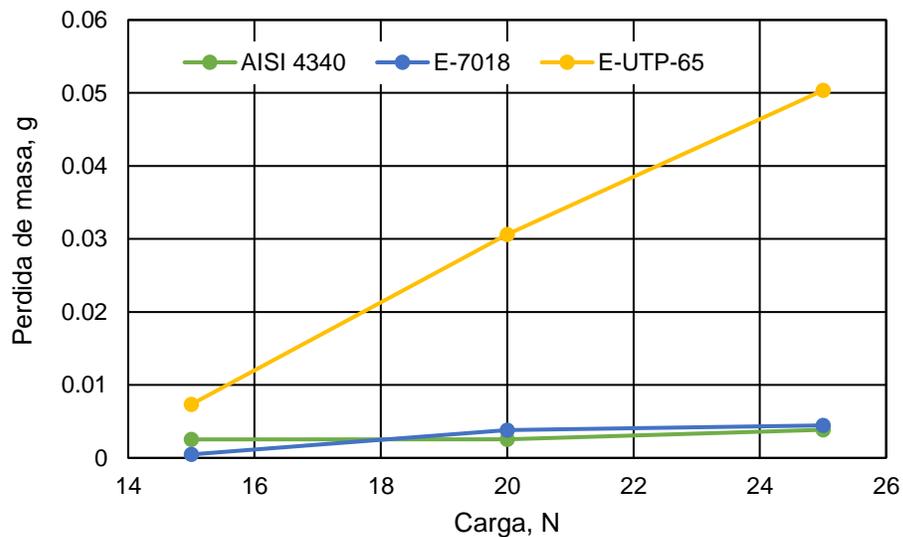


Figura 3.14. Curvas de pérdida de masa de las espigas con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de discos sin y con calzados con E-7018 y UTP-65, con cargas de 15, 20 y 25 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.

3.3.2. ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN

A partir de la información obtenida de las curvas presentadas anteriormente en las Figuras 3.1 - 3.11, se puede observar que existe una fluctuación muy significativa entre los primeros 100 y 200 metros de deslizamiento, posteriormente, en algunos casos, el coeficiente de fricción presentó pequeños incrementos durante los 300 m iniciales, pero generalmente se mantuvo fluctuante entre los valores obtenidos durante el primer intervalo. Así, el coeficiente de fricción se mantuvo oscilando en el intervalo de 1 a 0.3, con excepción de las Figura 3.3 y 3.6 que presentan fluctuaciones significantes que dejan ver la inestabilidad en la fricción en el metal base acero AISI 4340 y el calzado E-7018, ambas gráficas corresponden a los ensayos con carga de 25 N y distancia de deslizamiento de 1000 m. En la Tabla 3.8 se presentan los valores promedio y su respectiva desviación estándar del coeficiente de fricción obtenidos para cada combinación de variables del ensayo.

De los resultados de fricción presentados en la Tabla 3.8 se puede apreciar que el coeficiente de fricción entre un acero AISI 4340 calzado y una espiga de acero AISI O1 resulta ser ligeramente mayor en comparación con el acero AISI 4340 sin calzado, aunque para el caso del acero AISI 4340 sin calzado el coeficiente de fricción es muy inestable. En la Tabla 3.8, también, se puede apreciar que para la condición de 20 N de carga el coeficiente de fricción es menor en comparación con las demás cargas para todos los materiales ensayados. En el caso de los discos calzados con electrodo UTP-65 se obtuvo un coeficiente de fricción más alto para las diferentes condiciones de ensayo, aunque es de resaltar que el coeficiente de fricción en este material es más estable lo que se traduce en menor pérdida de masa.

De acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos y el tratamiento de la información, se puede concluir que la caracterización del desgaste para las diferentes combinaciones de materiales dependerá de las condiciones de trabajo a las que serán sometidos, pero la disminución en la condición de pérdida de masa de un acero AISI 4340 con calzado es claramente menor.

Tabla 3.8. Valores promedio del coeficiente de fricción entre discos de acero AISI 4340 sin y con calzado y un pin de acero AISI O1.

Material del disco	Carga, kg	N° de disco	Coeficiente de fricción promedio por ensayo, ua	Coeficiente de fricción promedio, ua	Desviación estándar
MB	15	1	0.70298	0.60699	0.13287
		2	0.45534		
		3	0.66267		
	20	4	0.47537	0.45341	0.01904
		5	0.44125		
		6	0.44363		
	25	7	0.53371	0.66495	0.11470
		8	0.71518		
		9	0.74598		
E-7018	15	10	0.70011	0.61334	0.11962
		11	0.47688		
		12	0.66303		
	20	13	0.68098	0.62515	0.04906
		14	0.60562		
		15	0.58886		
	25	1	0.57026	0.68480	0.10838
		17	0.78574		
		18	0.69841		
UTP 65	15	19	0.82956	0.81539	0.01228
		20	0.80768		
		21	0.80893		
	20	22	0.64305	0.65728	0.01286
		23	0.66810		
		24	0.66068		
	25	25	0.80403	0.80297	0.05188
		26	0.85432		
		27	0.75056		

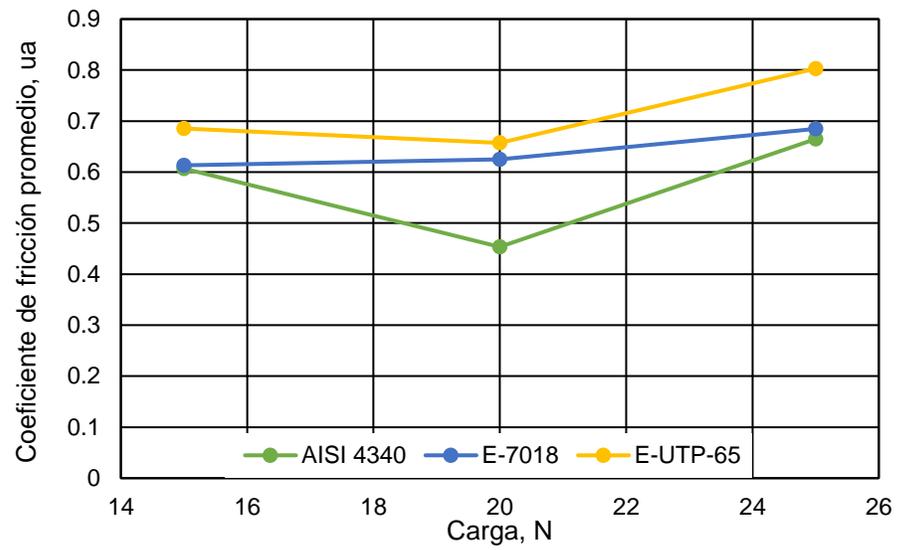


Figura 3.15. Curvas de valores promedios de fricción entre discos y espigas respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de discos sin y con calzados con E-7018 y UTP-65, con cargas de 15, 20 y 25 N y distancia de deslizamiento de 1000 m.

CONCLUSIONES

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

- ✓ Para la carga de 25 N, se obtuvo una disminución significativa en la pérdida de masa en el acero AISI 4340 con calzados con electrodos AWS UTP-65 y E-7018 en comparación con los discos de acero AISI 4340 sin calzado.
- ✓ Se puede observar que los discos calzados con electrodo AWS UTP-65 es el que pierde menos masa en comparación con el acero AISI 4340 calzado con electrodo E-7018 para las cargas de 15, 20 y 25 N ensayadas.
- ✓ Las pérdidas de masa del acero AISI O1 es mínima en comparación a las de los discos de acero AISI 4340 sin y con calzados tanto con electrodo AWS UTP-65 como con E-7018.
- ✓ Al realizar los ensayos de desgaste a la menor carga de 15 N para todos los ensayos se observó que la pérdida de masa fue menor en los discos de acero AISI 4340 sin calzado.
- ✓ La técnica de soldadura que se usó para depositar el metal de aporte a los discos, fue exitoso ya que no se observaron poros de considerables dimensiones durante el rectificado ni en el lijado fino, lo que contribuyó a no tener grandes fluctuaciones en los coeficientes de fricción.

REFERENCIAS

Archard, J. F. (1957). Proceedings of the Royal Society A.

García Ramírez, G. R. (2017). Estudio de desgaste tipo espiga sobre disco, utilizando un AISI 1020 cementado y un acero O1.

(<https://www.scribd.com/document/418816069/Estudio-de-Desgaste-Tipo-Espiga-Sobre-Disco-Utilizando-Un-AISI-1020-Cementado-y-Un-Acero-01>).

Askeland, D. R. (1998). Ciencia e Ingeniería de los Materiales.

Avner, S. H. (1988). Introducción a la Metalurgia Física.

Bowden, F. P. & Tabor, D. (1939). Proceedings of the Royal Society A.

Halling, J. (1975). Principles of Tribology. The Macmillan Press.

Greenwood, J. A. & Williamson, J. B. (1966). Proceedings of the Royal Society A.

Halliday, J. S. (1955). Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers.

Holm, R. (1946). Electrical Contacts. Stockholm.

Sampén, L. (s.f.). Pautas Para el Diseño de Partes Metálicas Resistentes al Desgaste.

Sarkar, A. D. (1990). Desgaste de Metales. México D.F.; México: Limusa.

Luengo López, Ó. (2008) Estudio tribológico de fricción y desgaste de capas de aleación NiP.

(<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6299/Memoria>).