

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



**ESTUDIO DEL RECUBRIMIENTO AUTOCATALÍTICO Ni-P  
DEPOSITADO EN UN ACERO SAE 1020, SOBRE EL  
DESGASTE TIPO ESPIGA SOBRE DISCO**

PRESENTADO POR:

**SERGIO ROBERTO CORTEZ RUBIO  
BRAYAN JOSUÉ GARCÍA GUERRA  
IRVIN ISMAEL HERNÁNDEZ MARTÍNEZ  
JORGE LUIS PINEDA PEÑA**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO MECÁNICO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE 2024

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR :

**MSc. JUAN ROSA QUINTANILLA**

SECRETARIO GENERAL :

**Lic. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

DECANO :

**Ing. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA**

SECRETARIO :

**Arq. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

DIRECTOR INTERINO :

**M.Sc. e Ing. GUSTAVO SALOMÓN TORRES RÍOS LAZO**

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 DEL RECUBRIMIENTO AUTOCATALÍTICO Ni-P  
DEPOSITADO EN UN ACERO SAE 1020, SOBRE EL  
DESGASTE TIPO ESPIGA SOBRE DISCO**

Presentado por :

**SERGIO ROBERTO CORTEZ RUBIO  
BRAYAN JOSUÉ GARCÍA GUERRA  
IRVIN ISMAEL HERNÁNDEZ MARTÍNEZ  
JORGE LUIS PINEDA PEÑA**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

San Salvador, noviembre de 2024

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

**Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ**

**Tribunal Calificador:**

**Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz**

**Ing. Francisco Alfredo De León Torres**

**Ing. Rigoberto Velásquez Paz**

## DEDICATORIA

Este trabajo de graduación está dedicado a:

### **Mis queridos padres:**

Antonia Armida Rubio de Cortez y José Hernán  
Cortez Rosales.

*Sergio Roberto*

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de graduación está dedicado a:

### **Mis padres:**

José Antonio García Pérez y Dora Alicia Guerra.

### **Mis hermanos:**

Elmer Antonio García Guerra, Jonathan Fernando García Guerra y Johana Michelle García Guerra.

*Brayan Josué*

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de graduación está dedicado a:

### **Mis padres:**

Delmy Anelly Martínez y Ernesto Hernández  
(Q.E.P.D.).

### **Mi abuela:**

Elba Elizabeth Mendoza.

### **Mi hermana:**

Carmen Arely Hernández Martínez.

### **La memoria a mi abuelo:**

Ismael Martínez.

*Irwin Ismael*

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de graduación está dedicado a:

### **Mis padres:**

Rosa Yanira Peña y Manuel de Jesús Pineda.

### **Mi abuela:**

Santos Domitila Peña “Mamatila” (Q.E.P.D.).

### **Mis hermanos:**

Diana Pineda, Alexander Pineda, Esmeralda Pineda, Naomi y Gabriela.

*Jorge Luis*

## AGRADECIMIENTO

Quisiera expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia, cuyo apoyo incondicional ha sido fundamental en el transcurso de mi carrera en Ingeniería Mecánica. Desde el inicio de esta etapa académica, mi familia ha sido mi pilar, brindándome el respaldo emocional y práctico necesario para enfrentar los desafíos y disfrutar de los logros alcanzados. Cada sacrificio, cada palabra de aliento y cada gesto de comprensión han contribuido a que hoy pueda celebrar la culminación de este importante capítulo en mi vida.

A mis padres por su paciencia, amor y constante motivación. Sin su apoyo, no habría sido posible superar los momentos más exigentes ni alcanzar las metas que me propuse. Su fe en mí y su compromiso han sido una fuente constante de inspiración y fortaleza.

A mis compañeros de carrera, quienes han hecho de esta experiencia algo inolvidable. Su amistad y colaboración han sido fundamentales para entender los temas más complejos y para disfrutar de cada logro juntos. Cada momento compartido ha enriquecido mi aprendizaje y ha creado recuerdos que atesoraré para siempre.

Y a mis catedráticos, cuya dedicación y paciencia han dejado una huella imborrable en mi formación. Gracias por su compromiso y por compartir su conocimiento con nosotros. Su guía ha sido esencial para que podamos enfrentar los retos experimentales y crecer como profesionales.

Finalmente, al Consejo de Investigaciones Científicas de la Universidad de El Salvador (CIC-UES) por el financiamiento de los equipos a través de los proyectos N° 12-10 y N°17-15.

*Sergio Roberto*

## AGRADECIMIENTO

Al Creador, por la bendición de seguir viviendo, por permitirme levantarme y continuar adelante tras cada tropiezo, sin importar cuándo, dónde ni cómo. Su guía y fortaleza han sido mi motor constante.

A mi Familia, en especial a mis padres, Dora Alicia Guerra y José Antonio García Pérez, quienes, con su amor y dedicación, han sido el pilar fundamental en mi vida. Siempre han creído en mí, brindándome el ejemplo más inspirador de valentía, esfuerzo y perseverancia. por los valores y hábitos que me inculcaron, que han sido esenciales en mi formación, tanto como persona como profesional. Su apoyo incondicional no solo me ha impulsado a alcanzar mis metas, sino que ha sido, y seguirá siendo, mi mayor fuente de inspiración y motivación.

A mis hermanos, gracias por su paciencia y por estar a mi lado, tanto en los momentos más difíciles como en los de alegría, acompañándome en cada etapa de mi vida.

A mis amigos, por todo el apoyo que me brindaron a lo largo de este proceso tan importante. Culminar mi trabajo de graduación no habría sido posible sin su compañía constante, sus palabras de aliento y el impulso que me dieron en cada paso del camino. Sus consejos, su paciencia y su disposición para escucharme marcaron una diferencia significativa. Cada uno de ustedes, de distintas maneras, fue fundamental para que me mantuviera enfocado y no me rindiera ante las dificultades.

A nuestro asesor Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz por su tiempo y conocimientos, esenciales para el desarrollo de este trabajo de graduación. Su guía fue invaluable. También extendo mi gratitud a todo el personal académico que, de una u otra manera, contribuyó a mi formación a lo largo de este camino.

Finalmente, al Consejo de Investigaciones Científicas de la Universidad de El Salvador (CIC-UES) por el financiamiento de los equipos a través de los proyectos N° 12-10 y N°17-15.

*Brayan Josué*

## AGRADECIMIENTO

Primeramente, a Dios, por haberme ayudado a finalizar esta carrera, que gracias a él y sus bendiciones estoy terminando una etapa de mi vida. Así mismo, agradezco principalmente a mi madre Delmy Anelly Martínez quién es la que estuvo siempre apoyándome con sus oraciones y su apoyo incondicional, también agradezco a mi padre Ernesto Hernández porque a pesar de todo, pude cumplirle la promesa hecha antes de partir con Dios; de igual manera, agradezco a mi hermana Carmen por su apoyo que me dio a lo largo de la travesía de esta carrera; además, agradezco a mi “segunda madre” como le digo yo, mi abuela Elba Elizabeth quién también estuvo siempre pendiente de mi a lo largo de todo este proceso.

Posteriormente, a cada una de las personas que estuvieron presente en toda mi vida hasta este punto, comenzando con Atilio Ramírez (Q.E.P.D.) quién sin sus regaños todo esto no hubiera sido posible, desde que fue director del colegio donde salí, de igual forma, agradezco a Luis Ramírez, Profesor de Matemáticas y Física, quién fue uno de los principales que me motivó a seguir mis estudios en el área de Física en el Programa Jóvenes Talento, de la Universidad de El Salvador.

También, a todas las personas que colaboraron directamente en este trabajo de graduación, comenzando con el Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz, por la guía, apoyo y confianza en nosotros para llevar a cabo dicho trabajo.

A todos profesores e instructores del colegio: Centro Psicopedagógico “La Paz”, siguiendo con todos los profesores e instructores que aportaron a mi formación académica de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

A mis amigos y compañeros que siempre me brindaron su apoyo.

Finalmente, al Consejo de Investigaciones Científicas de la Universidad de El Salvador (CIC-UES) por el financiamiento de los equipos a través de los proyectos N° 12-10 y N°17-15.

*Iruin Ismael*

## AGRADECIMIENTO

Primeramente, a Dios, por darme la fuerza de seguir adelante a pesar de los obstáculos y otorgarme la salud durante mis años de estudio.

A mis padres, por su amor incondicional, por sus valores y enseñanzas que han sido mi mayor guía. A mi madre Rosa Yanira Peña quien es la persona más importante del mundo para mí, la cual siempre está cuidándome y apoyándome sin importar nada, también a mi padre Manuel de Jesús Pineda por brindarme todo su apoyo y confianza durante todos estos años.

A mis hermanos los cuales siempre han estado apoyándome de distintas maneras y han sido muy importantes durante este proceso.

A mi abuela Santos Domitila Peña (Q.E.P.D.), la cual fue como una madre para mí en sus últimos años de vida.

A los profesores que, si me aportaron algo significativo, quienes no solo me impartieron conocimientos, sino que también me enseñaron a pensar de manera crítica, a ser curioso y a seguir mejorando. En especial, a mi tutor Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz, cuya paciencia y guía fueron fundamentales en el desarrollo de este trabajo.

Finalmente, a todas aquellas personas que, aunque no mencione aquí, han sido parte de este proceso. Cada palabra de aliento, cada gesto de apoyo, me ha ayudado a llegar hasta aquí.

Gracias a todos por creer en mí, por brindarme su apoyo y por ser parte de esta etapa tan importante de mi vida.

Finalmente, al Consejo de Investigaciones Científicas de la Universidad de El Salvador (CIC-UES) por el financiamiento de los equipos a través de los proyectos N° 12-10 y N°17-15.

*Jorge Luis*

# ESTUDIO DEL RECUBRIMIENTO AUTOCATALÍTICO Ni-P DEPOSITADO EN UN ACERO SAE 1020, SOBRE EL DESGASTE TIPO ESPIGA SOBRE DISCO

Estudiantes: Brs. Sergio Roberto Cortez Rubio<sup>1</sup>, Brayan Josué García Guerra<sup>2</sup>, Irvin Ismael Hernández Martínez<sup>3</sup> y Jorge Luis Pineda Peña<sup>4</sup>  
Docente asesor: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz<sup>5</sup>  
Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura,  
Universidad de El Salvador

## RESUMEN

Se ha realizado una investigación sobre desgaste mediante el método de ensayos de espigas de acero SAE O1 sobre discos de acero SAE 1020 recubiertos autocatalíticamente con Ni-P con post-tratamientos térmicos a 200 °C (PTT-1) y a 200 °C más 400 °C (PTT-2). Los recubrimientos autocatalíticos de Ni-P se obtuvieron en tres deposiciones realizadas a una temperatura de  $70 \pm 2$  °C, un pH de  $8 \pm 0.2$  y tiempo de deposición de 120 min. Los ensayos de desgaste se realizaron a una carga de 5 N y distancias de recorrido de 500, 1,000, 1,500 y 2,000 m y en cada condición experimental se ensayaron 5 pares de espiga y disco para cada condición de material. Se obtuvo un espesor promedio de los recubrimientos de 13  $\mu\text{m}$  y se determinaron para los recubrimientos con PTT-1 y PTT-2 valores de microdurezas Knoop de 254.87 y 397.49, respectivamente. Finalmente, se obtuvo mayor resistencia al desgaste para los recubiertos autocatalíticos de Ni-P con PPT-2 con respecto a recubrimientos autocatalítico de Ni-P con PPT-1, debido a la mayor dureza que presentan los recubrimientos de Ni-P con PTT-2; además, los coeficientes de fricción se incrementan rápidamente en los primeros instantes de los ensayos, luego alcanzan un estado de equilibrio.

**Palabras claves:** Desgaste, Autocatalítico, recubrimiento químico, Ni-P.

---

1 cortez4728@gmail.com

2 brayan98guerra@gmail.com

3 iihm\_200196@hotmail.com

4 jlpp790@gmail.com

5 jonathan.berrios@ues.edu.sv

# ÍNDICE GENERAL

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Desgaste.....	3
1.1.1. Tipos de desgaste.....	4
1.1.2. Topografía de las superficies.....	5
1.1.3. Estudio de la fricción.....	8
1.1.4. Teoría molecular de la fricción y el desgaste.....	11
1.1.5. Desgaste inicial.....	12
1.1.6. Desgaste por adherencia.....	13
1.2 Variables que afectan el proceso de desgaste.....	17
1.2.1. Efecto de la temperatura y la velocidad.....	17
1.3 Estudios sobre desgaste.....	20
1.3.1. Tipo de máquinas para ensayos de desgaste.....	20
1.3.2. Norma ASTM para ensayos de desgaste.....	21
1.3.3. Métodos para determinar el desgaste.....	22
1.4. Deposición autocatalítica Ni-P.....	23
1.4.1. Componentes de las soluciones autocatalíticas de Ni-P.....	24
1.4.2. Principales variables que afecta el proceso de deposición autocatalítica Ni-P.....	26
1.4.3. Aplicaciones del proceso de recubrimiento autocatalítico de Ni-P.....	29
1.5. Ensayos de desgaste en recubrimientos autocatalíticos de Ni-P.....	30
1.5.1. Ensayo 1. Comportamiento al desgaste de recubrimientos autocatalíticos de Ni-P y de Ni-P con Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	31
1.5.2. Ensayo 2. Mecanismo de desgaste de los recubrimientos autocatalíticos compuestos de Ni-P-BN(h).....	34
2. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	35
2.1. Diagrama de flujo de la metodología experimental.....	36
2.2. Dimensionamiento de los discos para ensayo de desgaste.....	38
2.3. Maquinado de los discos.....	39
2.4. Tratamiento térmico de recocido de alivio de esfuerzos residuales de los discos.....	44

	Pág.
2.5. Tratamiento térmico de las espigas.....	45
2.6. Lijado y pulido de discos.....	47
2.7. Deposición del recubrimiento autocatalítico de Ni-P.....	48
2.7.1. Pasivación de los elementos en contacto con la solución.....	50
2.7.2. Preparación de la solución autocatalítica de Ni-P.....	51
2.7.3. Preparación de los discos para deposición.....	53
2.7.4. Proceso de deposición del recubrimiento autocatalítico de Ni-P.....	56
2.8. Post-tratamientos térmicos.....	57
2.9. Medición de espesores.....	58
2.10. Determinación de la dureza por microindentación.....	61
2.11. Preparación de los discos y espigas.....	64
2.12. Ensayo de desgaste tipo espiga sobre disco.....	65
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	70
3.1. Resultados de las mediciones de los espesores de los recubrimientos autocatalíticos de Ni-P.....	70
3.2. Determinación de la dureza.....	75
3.3. Resultados de los ensayos de desgaste.....	79
3.4. Análisis de resultados.....	86
3.4.1. Análisis estadístico de desgaste.....	86
3.4.2. Análisis del coeficiente de fricción.....	88
CONCLUSIONES.....	91
BIBLIOGRAFÍA.....	93

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1. Composición química de los aceros a estudiar en condiciones de entrega.....	39
Tabla 2.2. Reactivos necesarios para preparación de solución autocatalítica de Ni-P [29].....	51
Tabla 2.3. Condiciones y variables bajo las que se realiza los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco.....	67
Tabla 2.4. Tiempos requeridos para las distancias de deslizamientos establecidas.....	68
Tabla 3.1. Resultados de las mediciones de los espesores de los recubrimientos para todos los lotes de los discos recubiertos y valores promedios y desviaciones estándar de los espesores.....	75
Tabla 3.2. Valores de microdureza Knoop sobre discos de acero SAE 1020 con recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PPT-1.....	75
Tabla 3.3. Valores de microdureza Knoop sobre discos de acero SAE 1020 con recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PPT-2.....	76
Tabla 3.4. Valores de desgaste de los discos con recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PPT-1 utilizando una carga de 5 N y espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas.....	80
Tabla 3.5. Valores de desgaste de los discos con recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PPT-2 utilizando una carga de 5 N y espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas.....	80
Tabla 3.6. Valores de desgaste de espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas, aplicando una carga de 5 N sobre discos de acero SAE 1020 con recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PPT-1.....	81
Tabla 3.7. Valores de desgaste de espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas, aplicando una carga de 5 N sobre discos de acero SAE 1020 con recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PPT-2.....	81
Tabla 3.8. Valores promedio del coeficiente de fricción entre pares de discos con recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PPT-1 y espigas de acero SAE O1 con una carga de 5 N.....	89
Tabla 3.9. Valores promedio del coeficiente de fricción entre pares de discos con recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PPT-2 y espigas de acero SAE O1 con una carga de 5 N.....	90

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1. Trazos idealizados de las asperezas de una superficie que presentan la misma altura entre crestas y valles, aunque diferentes longitudes de onda.....	6
Fig. 1.2. Asperezas superficiales. $R_t$ es la altura máxima entre crestas y valles [1].....	7
Fig. 1.3. 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.....	8
Fig. 1.4. Curva característica de la pérdida de peso vs distancia de deslizamiento [1].....	13
Fig. 1.5. Razón de desgaste vs. presión de contacto aparente [7].....	14
Fig. 1.6. Variación de la razón del desgaste con la temperatura para un latón (60/40), sobre acero para herramientas.....	18
Fig. 1.7. Variación de la razón de desgaste y la transferencia de metal con la velocidad. Carga 22.5 kg.....	20
Fig. 1.8. Ensayo de espiga sobre disco.....	21
Fig. 1.9. Efecto de la temperatura de la solución en la tasa de deposición.....	27
Fig. 1.10. Efecto del pH de la solución sobre la tasa de deposición y el contenido de fósforo del recubrimiento.....	28
Fig. 1.11. Efecto de la temperatura de post-tratamiento térmico sobre la resistencia al desgaste de los recubrimientos: a) De Ni-P; y b) de Ni-P con $Al_2O_3$ .....	32
Fig. 1.12. Micrografías de superficies de desgaste y residuos y análisis EDX de residuos de desgaste de un recubrimiento autocatalítico de Ni-P.....	33
Fig. 1.13. Micrografías de superficies de desgaste y residuos y análisis EDX de residuos de desgaste de un recubrimiento autocatalítico de Ni-P con $Al_2O_3$ .....	34
Fig. 2.1. Flujograma de la metodología experimental.....	37
Fig. 2.2. Dimensiones de los especímenes utilizados en el ensayo tipo espiga sobre disco: a) Disco; y b) espiga. Cotas en mm.....	38
Fig. 2.3. Probeta disco, modelo 3D: a) Disco; y b) espiga.....	39
Fig. 2.4. Cilindrado de la barra de acero SAE 1020.....	40
Fig. 2.5. Proceso de corte: a) Corte de discos; y b) sierra industrial.....	40
Fig. 2.6. Proceso de taladrado de los discos.....	41
Fig. 2.7. Proceso de refrentado de las caras.....	41
Fig. 2.8. Proceso de biselado de los discos.....	42
Fig. 2.9. Proceso de rectificado: a) Rectificadora; y b) probeta siendo rectificada.....	43
Fig. 2.10. Esquema del tratamiento térmico de recocido de alivio de esfuerzos residuales para un acero SAE 1020.....	45

	Pág.
Fig. 2.11. Curva de variación temperatura vs tiempo para el tratamiento térmico de temple y ..46 revenido de las espigas de acero SAE O1.....	46
Fig. 2.12. Sistema para la deposición auto catalítica de recubrimientos de Ni-P.....	48
Fig. 2.13. Ensayo en un vaso Beaker de 500 ml.....	50
Fig. 2.14. Balanza digital.....	52
Fig. 2.15. Hot Plate con agitador magnético Fisher Scientific.....	52
Fig. 2.16. Flujoograma de proceso de preparación de discos para deposición de..54 recubrimiento autocatalítico de Ni-P.....	54
Fig. 2.17. Cámara de baño ultrasónico utilizada.....	55
Fig. 2.18. Bandeja que contiene soda cáustica a 60 °C sobre cocina a gas de dos..55 quemadores.....	55
Fig. 2.19. Discos depositados.....	56
Fig. 2.20. Configuración de la cámara de gas inerte.....	57
Fig. 2.21. Esquema de los post-tratamientos térmicos realizados a los conjuntos depósito- substrato.....	58
Fig. 2.22. Corte de la muestra metalográfica.....	59
Fig. 2.23. Pulidora marca Presi.....	60
Fig. 2.24. Microscopio óptico con cámara digital incorporada para la medición del espesor.....	61
Fig. 2.25. Durómetro INNOVATEST, modelo VERZUS 750CCD.....	62
Fig. 2.26. Posición del porta probeta durante la prueba de dureza.....	63
Fig. 2.27. Posición del porta probeta bajo el lente.....	63
Fig. 2.28. Módulos para estudios tribológicos marca GUNT: a) Módulo básico modelo TM 260.3; y b) módulo de control modelo TM 260.....	65
Fig. 2.29. Balanza analítica.....	66
Fig. 3.1. Ubicación de los discos utilizados para medir los espesores de cada lote de probetas recubiertas con depósito autocatalítico de Ni-P.....	71
Fig. 3.2. Micrografía proveniente del lote 1 en: a) Posición 1; b) posición 2; y c) posición 3....	72
Fig. 3.3. Micrografía proveniente del lote 2 en: a) Posición 1; b) posición 2; y c) posición 3....	73
Fig. 3.4. Micrografía proveniente del lote 3 en: a) Posición 1; b) posición 2; y c) posición 3....	73
Fig. 3.5. Indentaciones de microdureza Knoop en discos de acero SAE 1020 con recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PTT-1, utilizando una carga de 1 kg en durómetro INNOVATEST, modelo VERZUS 750CCD: a) Lectura 1; b) lectura 2; c) lectura 3; d) lectura 4; y e) lectura 5.....	77

Fig. 3.6. Indentaciones de microdureza Knoop en discos de acero SAE 1020 con recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PTT-2, utilizando una carga de 1 kg en durómetro INNOVATEST, modelo VERZUS 750CCD: a) Lectura 1; b) lectura 2; c) lectura 3; d) lectura 4; y e) lectura 5.....	78
Fig. 3.7. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos con PPT-1 y una espiga de acero SAE O1, con carga de 5 N y distancia de deslizamiento de 500 m.....	82
Fig. 3.8. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos con PPT-1 y una espiga de acero SAE O1, con carga de 5 N y distancia de deslizamiento de 1,000 m.....	82
Fig. 3.9. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos con PPT-1 y una espiga de acero SAE O1, con carga de 5 N y distancia de deslizamiento de 1,500 m.....	83
Fig. 3.10. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos con PPT-1 y una espiga de acero SAE O1, con carga de 5 N y distancia de deslizamiento de 2,000 m.....	83
Fig. 3.11. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos con PPT-2 y una espiga de acero SAE O1, con carga de 5 N y distancia de deslizamiento de 500 m.....	84
Fig. 3.12. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos con PPT-1 y una espiga de acero SAE O1, con carga de 5 N y distancia de deslizamiento de 1,000 m.....	84
Fig. 3.13. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos con PPT-1 y una espiga de acero SAE O1, con carga de 5 N y distancia de deslizamiento de 1,500 m.....	85
Fig. 3.14. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos con PPT-1 y una espiga de acero SAE O1, con carga de 5 N y distancia de deslizamiento de 2,000 m.....	85
Fig. 3.15. Curva de pérdida de masa respecto a la distancia de deslizamiento.....	88

## LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

- A': Área de la trayectoria
- A<sub>t</sub>: Área de contacto real entre caras
- A<sub>0</sub>: Constante de Arrhenius
- d, Ø: Diámetro de indentación
- e: Número de hileras de átomos
- E: Energía media
- EDS: Espectroscopía por Dispersión de Energía
- EN Níquel sin electricidad
- ENP: Deposición de níquel sin electricidad
- E<sub>t</sub>: Energía total disipada
- F: carga normal
- F<sub>t</sub>: Fuerza tangencial o Resistencia a la fricción total
- F<sub>0</sub>: Fuerza interatómica de cohesión
- h: Altura
- H: Hidrogeno
- m: Masa total de metal eliminado
- ρ<sub>0</sub>: Valor medio aritmético de las fuerzas individuales de repulsión
- pH: Potencial de hidrógeno
- PPT: Post-tratamiento térmico
- r: Radio de la trayectoria de deslizamiento
- R: Constante universal de los gases
- R<sub>a</sub>: línea central media
- R<sub>t</sub>: Altura máxima de una cresta a un valle
- S: Distancia de deslizamiento
- t: Tiempo
- T: Temperatura
- v: Velocidad de deslizamiento
- V: Volumen
- V/S: Razón de volumen desgastado
- α: Factor de probabilidad
- β: Número de átomos que se eliminan por encuentro
- ξ: Espesor crítico de óxido
- μ: Coeficiente de fricción
- ρ: Densidad del metal que se desgasta

$\sigma_a$ : Presión de contacto aparente

$\sigma_y$ : Esfuerzo de fluencia

$\tau$ : Esfuerzo cortante del metal

$\omega$ : Velocidad angular

## INTRODUCCIÓN

En la industria, el acabado superficial de las piezas es un proceso crucial que no solo mejora la apariencia estética, sino que también incrementa la durabilidad y la funcionalidad de los productos finales. Los acabados industriales pueden incluir una variedad de tratamientos como lo pueden ser pintura, anodizados, cementación y los recubrimientos metálicos, cada uno con aplicaciones específicas dependiendo de las condiciones de operación de cada pieza. Entre estos tratamientos, los recubrimientos metálicos han ganado particular relevancia debido a su capacidad para proteger las superficies de la corrosión, mejorar la resistencia al desgaste y extender la vida útil de las piezas.

Uno de los recubrimientos metálicos más destacados es el recubrimiento autocatalítico de níquel. Este proceso, también conocido como niquelado químico, consiste en la deposición de una capa de níquel-fósforo o níquel-boro sobre una superficie sin la necesidad de corriente eléctrica. A diferencia de los recubrimientos electrolíticos tradicionales, el niquelado químico ofrece una distribución uniforme del recubrimiento, incluso en geometrías complejas, lo que lo hace ideal para aplicaciones en las que se requiere una protección completa y homogénea.

Las ventajas del recubrimiento de níquel-fósforo son numerosas. Este tipo de recubrimiento proporciona una excelente resistencia a la corrosión, lo que es especialmente importante para piezas que son sometidas a ambientes agresivos o expuestas a condiciones extremas. Además, diferentes estudios indican que el níquel-fósforo mejora la dureza superficial de las piezas, lo que aumenta su resistencia al desgaste. Esta característica es crucial ya que reduce el deterioro y prolonga la vida útil del componente en aplicaciones donde las piezas están sometidas a un contacto constante con otras piezas.

El desgaste de las piezas es un fenómeno inevitable en la mayoría de las aplicaciones industriales, y su impacto puede ser significativo. La pérdida de material debido al desgaste puede alterar las dimensiones precisas de los componentes, afectando su funcionalidad y precisión. Esto es especialmente crítico en aplicaciones que requieren tolerancias estrictas. La acumulación de desgaste también puede llevar a una

mayor frecuencia de mantenimiento y reemplazo de piezas, resultando en costos adicionales y tiempos de inactividad no programados. En casos extremos, el desgaste excesivo puede provocar fallos prematuros de los componentes, lo que puede causar daños adicionales a la máquina y aumentar los costos de reparación.

Por lo tanto, comprender el desgaste al que está sometida una pieza es esencial para garantizar su funcionamiento óptimo y prolongar así su vida útil. Existen diferentes métodos para evaluar el desgaste de un material, y uno de los más utilizados es el ensayo de espiga sobre disco (pin-on-disk). Esta técnica permite simular condiciones de fricción y desgaste controladas para analizar el comportamiento de los materiales bajo diferentes cargas y velocidades.

En el contexto de recubrimientos de níquel-fósforo, los ensayos espiga sobre disco son particularmente útiles para evaluar la mejora en la resistencia al desgaste que estos recubrimientos proporcionan respecto al metal base. Estos ensayos permiten cuantificar la efectividad del recubrimiento en condiciones controladas, ofreciendo datos que son importantes para validar su desempeño en aplicaciones industriales.

El uso de recubrimientos como el níquel-fósforo, combinado con ensayos rigurosos de desgaste, permite a la industria desarrollar productos más resistentes y fiables, lo que se traduce en un mejor rendimiento y menores costos de mantenimiento a lo largo del tiempo.

En este contexto, queda claro que la elección del recubrimiento y la evaluación de su desempeño son factores cruciales para asegurar la durabilidad y eficiencia de las piezas industriales. El presente trabajo se centrará en el estudio del comportamiento al desgaste de un recubrimiento de níquel-fósforo (Ni-P) aplicado sobre un acero SAE 1020 como metal base. A través de ensayos de espiga sobre disco, se analizará el comportamiento al desgaste del recubrimiento en condiciones controladas, permitiendo obtener información valiosa sobre su desempeño.

## **1. MARCO TEÓRICO**

En el ámbito de la ingeniería de materiales, el estudio del desgaste de superficies y las técnicas de recubrimiento han adquirido una importancia creciente debido a su relevancia en la mejora de la durabilidad y rendimiento de componentes mecánicos sometidos a condiciones adversas. Uno de los métodos de recubrimiento más ampliamente investigados es el recubrimiento autocatalítico de níquel-fósforo (Ni-P).

En este contexto, este capítulo tiene como objetivo explorar los fundamentos teóricos del desgaste de materiales, así como los principios y características del recubrimiento autocatalítico de Ni-P.

### **1.1. DESGASTE**

Siempre que exista un movimiento relativo entre dos sólidos que soportan carga, existe una situación potencial de desgaste, dicho movimiento puede ser unidireccional o de vaivén, ya sea deslizante o de rodamiento. Para el caso de estos dos últimos, también es posible una combinación de ambos, o el desgaste puede ocurrir debido a un movimiento oscilatorio de pequeñas amplitudes [1].

El desgaste puede afectar a una amplia variedad de materiales, desde metales hasta plásticos y cerámicas. A medida que las superficies se desgastan, se produce una disminución en su rendimiento, lo que puede resultar en el deterioro de la funcionalidad y la reducción de la vida útil de los componentes o estructuras. El estudio y la comprensión del desgaste son fundamentales en la ingeniería y la ciencia de materiales para desarrollar soluciones que minimicen sus efectos y mejoren la durabilidad de los materiales [1].

En este mismo sentido, recientemente, se ha reportado para un acero AISI 1045 templado con diferentes condiciones de revenido, un incremento en el desgaste en la medida que se incrementa la temperatura de revenido, lo cual se atribuyó a la disminución de la dureza [2].

### 1.1.1. TIPOS DE DESGASTE

En general, los sistemas de ingeniería implican el movimiento relativo entre componentes fabricados a partir de metales y no metales. El desgaste se puede clasificar según la naturaleza de las superficies en contacto, como son metal contra metal, metal contra no metal y metal contra fluido y se han identificado seis tipos principales de desgaste, los cuales son [1]:

- **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 son separadas 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. 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 [1].
- **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 [1].
- **El desgaste por erosión** es causado por un fluido a alta presión con partículas sólidas en suspensión que, al impactar sobre una superficie, arrancan material debido a los efectos de momentum de las partículas. La pérdida de material puede ser significativa, provocando roturas por fatiga. El grado de desgaste tiene relación con el ángulo de incidencia de la partícula con respecto a la superficie [1].
- **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 [1].
- **El desgaste por cavitación** se origina en superficies entre las que existe fluido, el cual da origen a la formación de burbujas de vapor cuando éste llega a una presión

menor que la presión de vapor. Estas burbujas son transportadas por el fluido hasta una región de mayor presión, donde el vapor regresa al estado líquido de forma súbita aplastándose bruscamente las burbujas. Si las burbujas de vapor se encuentran cerca o en contacto con una de las superficies cuando cambian de estado se producen presiones localizadas muy altas, ocasionando picaduras en dicha superficie [1].

- **El desgaste por fatiga** surge como resultado de las cargas cíclicas y es posiblemente el mecanismo predominante en la mayoría de los tipos de desgaste. Sin embargo, se tiene que considerar que un tipo particular de falla ha sido originado por fatiga resulta un tanto confuso, por lo que se reserva el uso del término solamente a la falla entre contactos lubricados, como en el caso de los rodamientos de bolas o rodillo, engranes, levas y entre otros mecanismos, donde la pérdida de material se produce debido al desbaste de capas superficiales o por picaduras, como en el caso de los engranes. Las grietas por fatiga suelen aparecer debajo de la superficie, en un punto donde el esfuerzo cortante es máximo [1].

### 1.1.2. TOPOGRAFÍA DE LAS SUPERFICIES

Es muy importante conocer la naturaleza original de las superficies a fin de comprender la interacción interfacial de las partes móviles de una maquinaria. Un aspecto relevante de las superficies es determinar si están libres de contaminantes u óxidos. Además, es necesario saber si una superficie es mecánicamente suave. Así, la premisa básica para comprender los mecanismos de fricción y desgaste es que no existe una superficie perfectamente plana a escala microscópica [1].

La obtención de una superficie perfectamente lisa no es posible mediante los métodos convencionales de preparación de superficies, como son el maquinado, pulido, cepillado, entre otros. Ya que en estos casos las superficies suelen presentar asperezas, es decir ondulaciones en la forma de colinas y valles. En la Fig. 1.1 se presentan trazos idealizados de las asperezas de una superficie con protuberancias de la misma profundidad, aunque la longitud de onda es grande o macrogeométrica (ver Fig. 1.1a); por tanto, esta superficie se define como lisa. En la Fig. 1.1b se observa que las

asperezas tienen una longitud de onda grande; este tipo de superficie se describe como lisa, aunque no plana. En la Fig. 1.1e, la longitud de onda es corta o microgeométrica y esta superficie se define como plana, aunque rugosa.

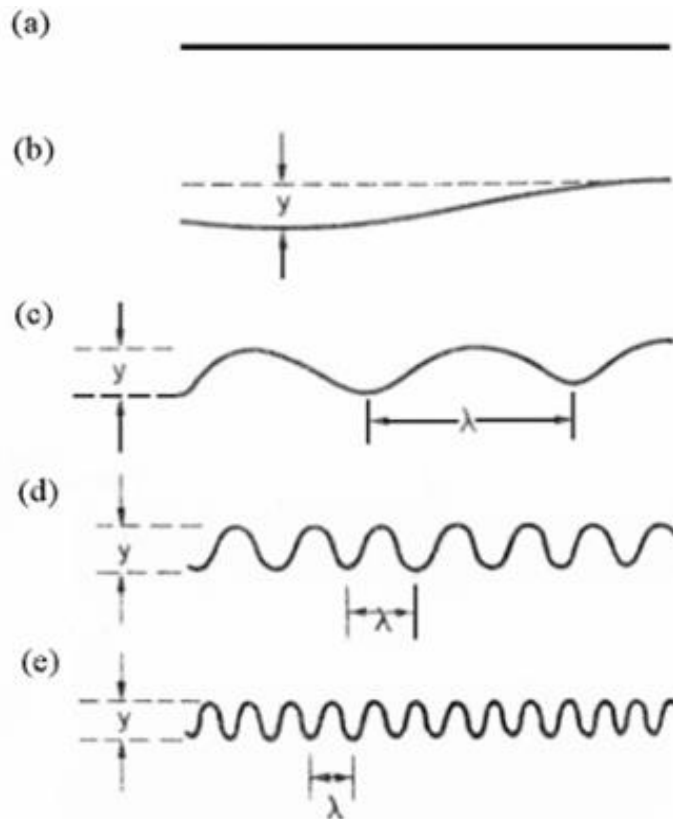


Fig. 1.1. Trazos idealizados de las asperezas de una superficie que presentan la misma altura entre crestas y valles, aunque diferentes longitudes de onda [1].

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

- a) La altura máxima de una cresta a un valle,  $R_t$  (ver Fig. 1.2) en mm;
- b) La línea central media,  $l$  en cm o  $R_a$ , y la raíz media cuadrática,  $R_S$ ; y
- c) La curva de apoyo.

Las superficies con diversos grados de rugosidad pueden tener el mismo valor de altura máxima de una cresta a un valle  $R_t$ , así que la medición de la altura entre cresta y valle no describe totalmente una superficie [1].



### 1.1.3. ESTUDIO DE LA FRICCIÓN

Cuando una superficie se coloca sobre otra, es necesario aplicar una fuerza horizontal finita para iniciar el deslizamiento. Esta fuerza horizontal corresponde a la fricción estática entre las dos superficies, cuya magnitud depende, entre otros factores, de la limpieza de las superficies en contacto; en el vacío, la fricción entre dos cuerpos es alta. La fuerza necesaria para mantener el deslizamiento debe ser mayor que la fricción cinética entre las dos superficies.

Bodwen y Tabor consideran la resistencia a la fricción entre dos superficies como la suma de dos componentes: una cortante y otra de compresión [3]. Si se considera que una espiga hemisférica se apoya sobre una superficie plana bajo la acción de una carga normal  $F$ , esta fuerza provoca que la superficie plana forme una curva cóncava AOB, cuya altura máxima OC es  $h$  y cuyo diámetro de cuerda es  $d$  (ver Fig. 1.3). Sea  $F_f$  la resistencia friccional, que es la fuerza tangencial necesaria para iniciar el deslizamiento [1].

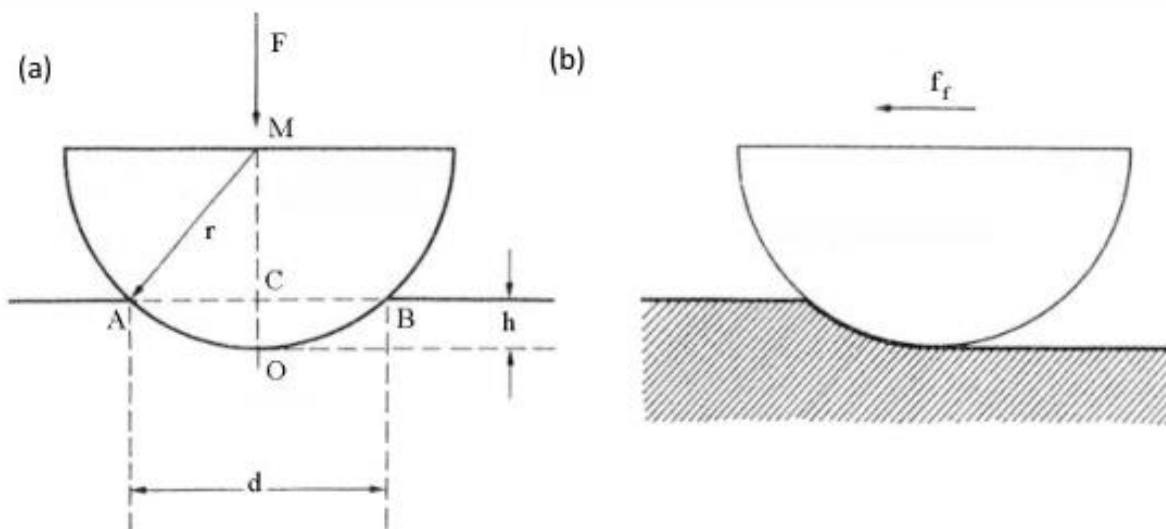


Fig. 1.3. Espiga hemisférica deslizándose sobre una superficie bajo la acción de una carga: a) Espiga estacionaria; y b) espiga en movimiento, produciendo una huella en forma de ranura [4].

El efecto de la carga  $F$  es provocar la deformación de aquellas asperezas de la superficie plana que han hecho contacto con la espiga. Esto es, las superficies de los dos cuerpos se adhieren donde hay contacto. Esto provoca 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 blanda [1].

Sí  $\tau$  es el esfuerzo cortante del metal de la superficie que ha fluido plásticamente y  $A_t$  es el área de contacto real entre caras, la fuerza cortante en la superficie (S) se define por la Ec. 1.3 [1]:

$$S = A_t \cdot \tau \quad (1.3)$$

donde:  $S$  es la fuerza cortante en la superficie en N,

$A_t$  es el área de contacto real entre caras en  $m^2$ , y

$\tau$  es el esfuerzo cortante del metal en  $N/m^2$ .

Es evidente que, para mover horizontalmente la espiga, se requiere de una fuerza adicional para desplazar la pared de metal delante de ella en la dirección del movimiento, a medida que se hunde en el metal de la superficie. Esta fuerza adicional es llamada factor de compresión  $P$ , la cual está dado por la Ec. 1.4 [1]:

$$P = A' \sigma_y \quad (1.4)$$

donde:  $P$  es factor de compresión en N,

$A'$  es el área de la trayectoria AOBC en  $m^2$ , y

$\sigma_y$  es esfuerzo de fluencia en  $N/m^2$ .

Así,  $A'$  se presenta como el área de contacto y está dada por la Ec. 1.5 [1]:

$$A' = \frac{d^3}{12r} \quad (1.5)$$

donde:  $d$  es diámetro de indentación en m, y

$r$  es el radio en m.

Sustituyendo  $A'$  en la Ec. 1.4 se obtiene la Ec. 1.6 [1]:

$$P = \frac{d^3}{12r} \sigma_y \quad (1.6)$$

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. 1.7 [1]:

$$F_f = S + P = A_t \tau + \frac{d^3}{12r} \sigma_y \quad (1.7)$$

Para metales duros apoyados sobre superficies similares, o posiblemente, para la mayoría de las combinaciones con cargas ligeras, la profundidad de indentación es pequeña. En estas condiciones, el término  $d$  en la Ec. 1.7 puede despreciarse, y el factor de compresión se vuelve insignificante. En este caso, se obtiene la Ec. 1.8 [1]:

$$F_f = A_t \tau \quad (1.8)$$

Por otro lado, el coeficiente de fricción ( $\mu$ ) es la resistencia a la fricción por unidad de carga, y está dado por la Ec. 1.9 [1]:

$$\mu = \frac{\tau}{\sigma_y} \quad (1.9)$$

Amontons en 1699 postuló dos leyes sobre la fricción, confirmadas por los resultados anteriores, las cuales son [1]:

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

#### 1.1.4. TEORÍA MOLECULAR DE LA FRICCIÓN Y EL DESGASTE

La teoría molecular de la fricción y del desgaste fue propuesta por Tomlinson en 1929. Este autor estudió detalladamente la naturaleza de las fuerzas atómicas en un retículo cristalino y dedujo expresiones para la fricción seca y el desgaste de sólidos [5].

La hipótesis de Tomlinson consiste, fundamentalmente, en que en condiciones de equilibrio las fuerzas de repulsión entre los átomos de un sólido contrarrestan las fuerzas de cohesión. Sin embargo, cuando dos superficies están en contacto, un átomo de uno de ellas puede llegar a estar lo suficientemente cerca de un átomo del otro cuerpo como para entrar al campo de repulsión. Cuando esto sucede, las dos superficies se separan causando una pérdida de energía que se manifiesta como la resistencia debida a la fricción [5].

Cuando un átomo se desplaza de su estado natural de equilibrio, tiende a regresar a su posición original. Sin embargo, durante una separación, puede entrar al campo de atracción de algún otro átomo vecino antes de volver a su posición original de equilibrio. En estas condiciones, el átomo en tránsito queda sujeto a una tracción dictada por la distancia de separación ( $l$ ) en ese instante y no se introducirá un error significativo si esta se considera equivalente a la fuerza interatómica de cohesión ( $F_0$ ) entre dos átomos en el cristal. La energía media ( $E$ ) para un contacto atómico puede, por lo tanto, se expresar como  $E = F_0 \cdot l$  y considerando que la energía total perdida es  $n \cdot E$ , la cual es igual al trabajo mecánico, expresado por  $\mu \cdot P_x$ , se obtiene la Ec. 1.10 [5]:

$$\mu = \alpha \frac{F_0 l}{e p_0} \quad (1.10)$$

donde:  $\mu$  es el coeficiente de fricción,

$\alpha$  es el factor de probabilidad,

$F_0$  es la fuerza interatómica de cohesión en N,

$l$  es la distancia de separación en m,

$e$  es la distancia interatómica del cristal en m, y

$p_0$  es el valor medio aritmético de las fuerzas individuales de repulsión en N.

Los términos  $F_0$  y  $p_0$  están asociados con las constantes elásticas del material. Además, en la Ec. 1.10 se indica 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 plantea que un átomo se puede desprender y mover a una distancia lo suficientemente dentro del campo de otro átomo en la superficie opuesta, donde encuentra una nueva posición de equilibrio. Esto significa que los átomos de un cuerpo pueden ser extraídos por los átomos en la superficie opuesta [1]. Según Tomlinson [5], este es el mecanismo del desgaste, y se expresa por la Ec. 1.11:

$$M = \frac{2 \alpha E_t \rho}{\mu \sigma_y} \quad (1.11)$$

donde:  $M$  es la masa total de metal eliminado en kg,

$\rho$  es la densidad del metal que se desgasta  $\text{kg/m}^3$ ,

$\sigma_y$  es el esfuerzo de fluencia en  $\text{N/m}^2$ ,

$\mu$  es el coeficiente de fricción,

$\alpha$  es el factor de probabilidad, y

$E_t$  es la energía total disipada en J.

En la Ec. 1.11 se demuestra que la masa total de material eliminado es inversamente proporcional al esfuerzo de fluencia.

### 1.1.5. DESGASTE INICIAL

Los procesos de desgaste en metales se clasifican según el tipo de mecanismo que cause la eliminación del material de las superficies. Si la pérdida de volumen o peso se grafica de forma continua en relación con la distancia de deslizamiento, se obtiene una

curva característica como la que se presenta en la Fig. 1.4. El punto O corresponde al inicio del ensayo; es decir, cuando la distancia de deslizamiento es cero [1].

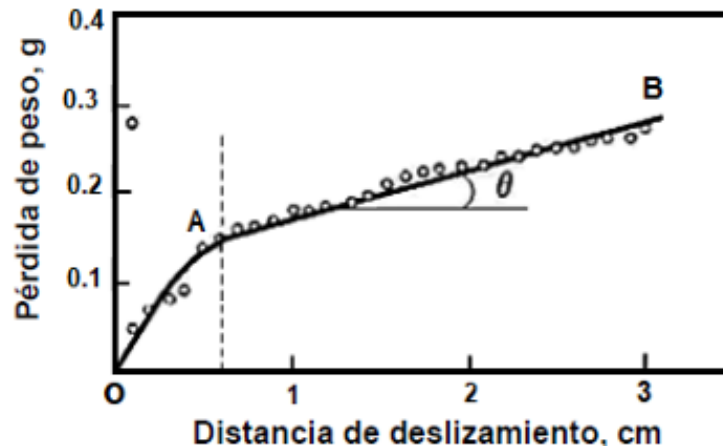


Fig. 1.4. Curva característica de la pérdida de peso vs distancia de deslizamiento [1].

La cantidad de volumen perdido en el tramo OA corresponde al desgaste inicial, mientras que el tramo AB representa el estado estacionario. La pendiente del régimen estacionario es lineal y se utiliza para expresar la razón de desgaste de un material por unidad de distancia de deslizamiento, bajo una carga y velocidad determinadas. Esta tasa será constante para cada material, dependiendo de la naturaleza de la otra superficie. Se ha demostrado que en ciertas partes de máquinas reales el patrón de la curva es el mismo que aparece en la Fig. 1.4 [1].

#### 1.1.6. DESGASTE POR ADHERENCIA

El desgaste por adherencia se define como el proceso que produce la pérdida de metal entre superficies que interactúan, debido a la adherencia entre asperezas. Este tipo de desgaste es severo y se puede presentar en la cadena cinemática de una máquina siempre que no exista una lubricación adecuada en la interfase de dos cuerpos en contacto [1].

Tomlinson [5] dedujo que el desgaste es inversamente proporcional al esfuerzo de fluencia del metal. De esta deducción tomó base Holm [6] 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 dada por la Ec. 1.12:

$$\frac{V}{S} = \beta \frac{F}{\sigma_y} = \beta A_t \quad (1.12)$$

donde:  $\beta$  es el número de átomos que se eliminan por encuentro,

$F$  es la carga aplicada en N,

$V/S$  razón de volumen desgastado  $m^3/m$ ,

$\sigma_y$  es el esfuerzo de fluencia en  $N/m^2$ , y

$A_t$  es el área real de contacto en  $m^2$ .

Se han realizado ensayos para determinar la razón de desgaste, haciendo correr espigas cónicas de latón y de acero sobre discos de acero, al graficar diferentes puntos del volumen de metal eliminado contra distancia de deslizamiento, se observa un período inicial de acoplamiento seguido por un estado estacionario de desgaste, como se puede observar en la Fig. 1.5 [1].

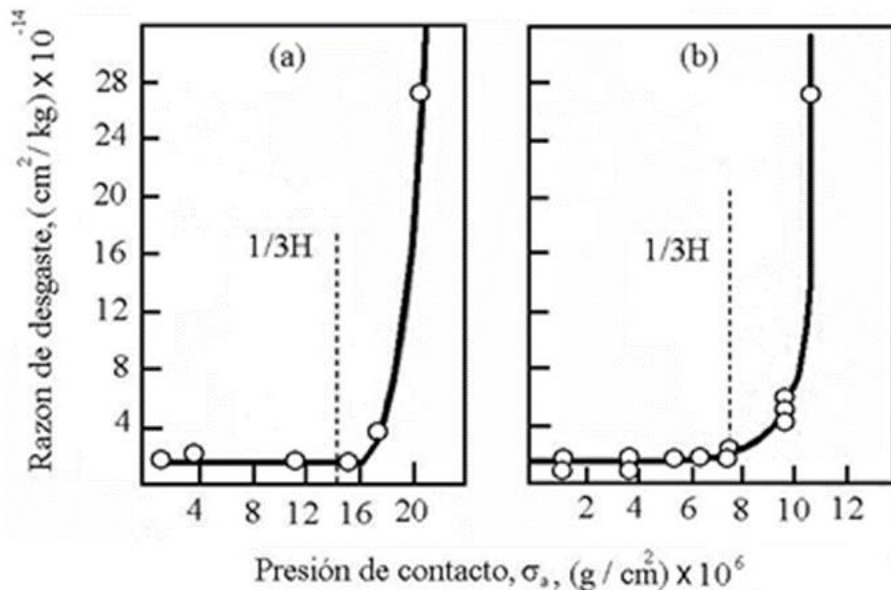


Fig. 1.5. Razón de desgaste vs. presión de contacto aparente [7].

A partir de la Fig. 1.5 Burwell y Strang [7] dedujeron la Ec. 1.13:

$$h = \beta \frac{\sigma_a}{\sigma_y} S \quad (1.13)$$

donde:  $h$  es la altura perdida debido al desgaste en m,

$\sigma_a$  es la presión de contacto aparente ejercida por la espiga sobre el disco en  $N/m^2$ ,

$\beta$  es la probabilidad de producir un fragmento por desgasten en un encuentro,

$\sigma_y$  es el esfuerzo de fluencia en  $N/m^2$ , y

$S$  es la distancia de deslizamiento en m.

No todas las uniones que se rompen forman residuos de desgaste. Esto es importante, ya 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. Esto puede significar que, a medida que se rompe la unión, los fragmentos permanecen adheridos a la superficie metálica en forma de áreas rugosas microscópicas o, si el material es plástico, se pueden extender sobre la superficie [1].

Las superficies reales no presentan una distribución regular de protuberancias hemisféricas; en cambio, sus formas varían, siendo 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 propaga a la superficie para producir residuos de desgaste [1].

La transferencia de metal de una parte a otra hará que una de las partes parezca más desgastada. Este desgaste se manifestará principalmente en las áreas de las asperezas y tenderá a ocurrir de forma lineal, lo cual se caracteriza como una condición de rayado. Si se desarrollan suficientes adhesiones, la fuerza requerida para romperlas

será superior a la fuerza aplicada en la operación, lo que impedirá que los metales se deslicen entre sí. Esto se conoce como condición de desbastado [1].

El desgaste por adherencia se ha analizado y como resultado se han obtenido ecuaciones, aunque tomando en consideración que las superficies que se encuentran en contacto estén perfectamente limpias. Una característica común en la mayoría de los metales es que sobre ellos se forma una capa de óxido cuando se les expone a un medio ambiente que contenga oxígeno. La presencia de óxidos altera la integridad de las uniones, lo que, por sí solo, provocaría la disminución del desgaste [1].

Para el desgaste mecánico se requieren  $1/\beta$  encuentros para que se acumule un espesor crítico de óxido ( $\xi$ ) 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.

El término  $\beta$  se puede expresar como:

$$\beta = A_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \frac{d}{v\xi^2\rho^2} \quad (1.14)$$

Luego sustituyendo en Ec. 1.12 se obtiene la Ec. 1.15, así:

$$\frac{V}{S} = \left[A_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \frac{d}{v\xi^2\rho^2}\right] \frac{F}{\sigma_y} \quad (1.15)$$

donde:  $A_0$  es la constante de Arrhenius en  $\text{kg}^2/(\text{m}^4\cdot\text{s})$ ,

$R$  es la constante universal de los gases en  $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ,

$T$  es la temperatura absoluta de la superficie deslizante en  $\text{K}$ ,

$d$  es el diámetro del área de contacto en  $\text{m}$ ,

$v$  es la velocidad de deslizamiento en  $\text{m}/\text{s}$ ,

$\xi$  es el espesor crítico de óxido en  $\text{m}$ , y

$\rho$  es la densidad de la capa de óxido en  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,

$F$  es la carga aplicada en  $\text{N}$ , y

$\sigma_y$  es la presión de flujo del metal más blando en  $\text{N}/\text{m}^2$ .

Rowe [8] realizó una modificación a la ecuación para el desgaste por adherencia que presento Holm [6] la cual fue incorporar un factor  $\alpha$  que toma en cuenta 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 [1]:

$$V = \alpha \beta A_t S \quad (1.16)$$

## **1.2. VARIABLES QUE AFECTAN EL PROCESO DE DESGASTE**

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

- 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 causar desgaste por abrasión, o bien los productos resultantes del proceso de corrosión pueden generar desgaste y provocar un daño posterior [9].

### **1.2.1. 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 en deslizamiento. La energía disipada debido al trabajo mecánico inevitablemente ocasiona un aumento en la temperatura. El

calor generado por la fricción se disipa en el área circundante, lo que ocasiona que las puntas de las asperezas alcancen temperaturas elevadas. 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 [1].

- **Temperatura**

J. K. Lancaster realizó experimentos a diferentes temperaturas con espigas de latón 60/40 sobre discos de acero, los cuales lo llevaron a demostrar que a medida que se incrementa la temperatura se aumenta la razón de desgaste de la espiga, logrando así determinar un valor límite de temperatura, el cual depende de la carga normal aplicada, tal como se presenta en la Fig. 1.6, y al sobrepasar el valor máximo, se observa una disminución en la tasa de desgaste del latón [10].

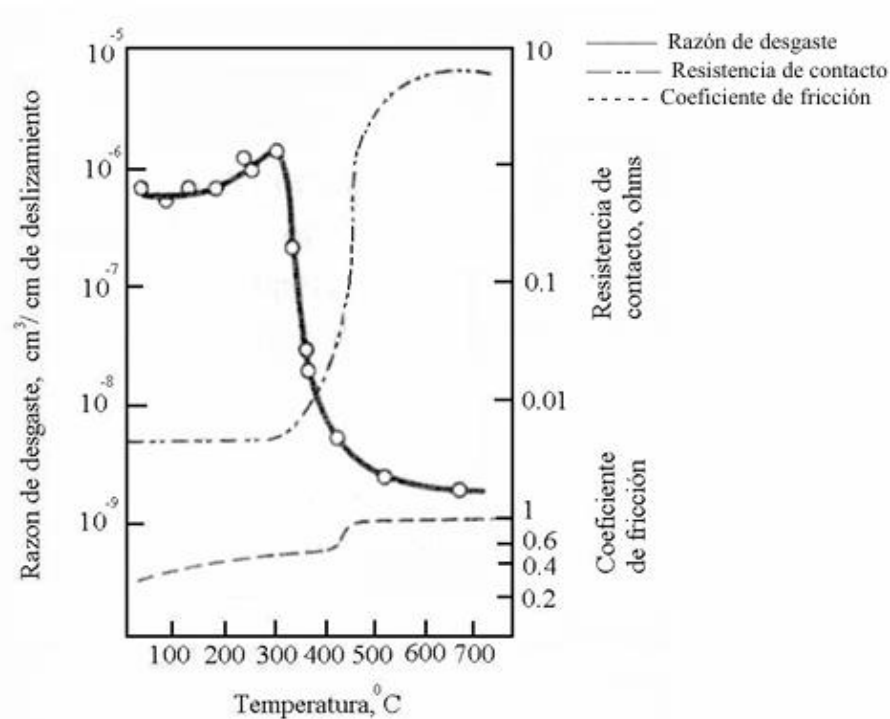


Fig. 1.6. Variación de la razón del desgaste con la temperatura para un latón (60/40), sobre acero para herramientas [10].

En la Fig. 1.6. 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 (ver Fig. 1.6) presenta que la resistencia de contacto es casi constante, aunque 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 [1].

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 [1].

- **Velocidad**

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, produciendo un aumento en la razón de desgaste. Esto sucede, si la temperatura de las superficies en contacto es suficientemente elevada como para reducir la dureza provocada por los efectos residuales. Se sabe que a velocidades muy altas se produce la fusión de las superficies en contacto, efecto que se acentúa si el punto de fusión y la conductividad térmica del material son bajos [1].

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 rango de velocidades de 0.01 a 500 cm/s utilizando una máquina de espiga sobre disco [11]. En la Fig. 1.7 se presenta la variación de razón de desgaste con una carga de 22.5 kg aplicándole velocidad y se observa una disminución seguida de un aumento en la razón de pérdida de metal cuando se sobrepasa una velocidad aproximada de 100 cm/s.

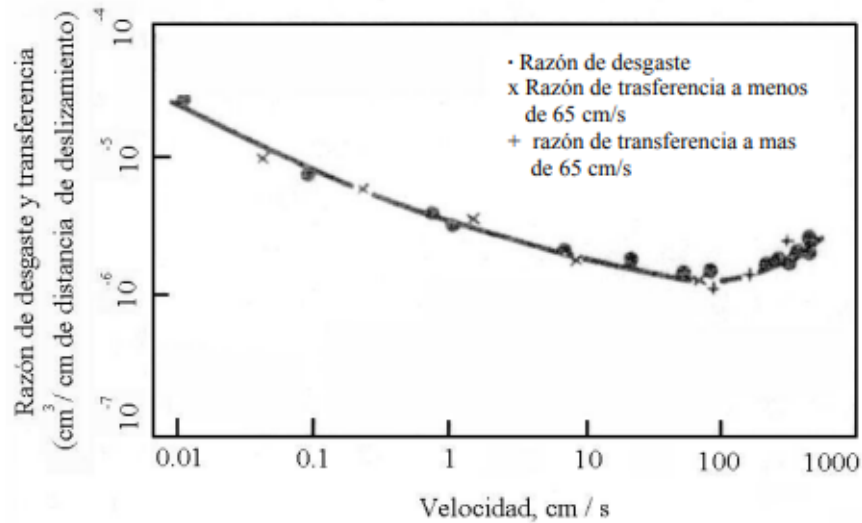


Fig. 1.7. Variación de la razón de desgaste y la transferencia de metal con la velocidad. Carga 22.5 kg [11].

### 1.3. ESTUDIOS SOBRE DESGASTE

Existen diferentes tipos de ensayos que se realizan para el estudio del desgaste y diversas condiciones bajo las cuales se llevan a cabo. A continuación, se mencionan los factores a considerar en un ensayo de desgaste, que incluyen las condiciones de prueba, las máquinas utilizadas y la normativa que rige dichos ensayos.

#### 1.3.1. TIPO DE MÁQUINAS PARA ENSAYOS DE DESGASTE

Existen diferentes tipos de máquinas utilizadas para realizar ensayos de desgaste entre las cuales cabe citar: espiga sobre mesa oscilante, espiga sobre buje, cilindros cruzados, espiga sobre cilindro, máquina de cuatro bolas y máquina de discos.

En el mismo sentido, la máquina que se seleccionará en esta investigación es la máquina de espiga sobre disco, la cual es usada para pruebas de desgaste, en ella la espiga (2) se coloca perpendicularmente a un disco giratorio (1), tal como se presenta en la Fig. 1.8. Las variables que rigen las pruebas son la carga normal, la velocidad de deslizamiento, la atmósfera y la temperatura ambiente. La cantidad de desgaste se puede

establecer pesando la espiga y/o disco en una balanza analítica antes y posterior al ensayo de desgaste.

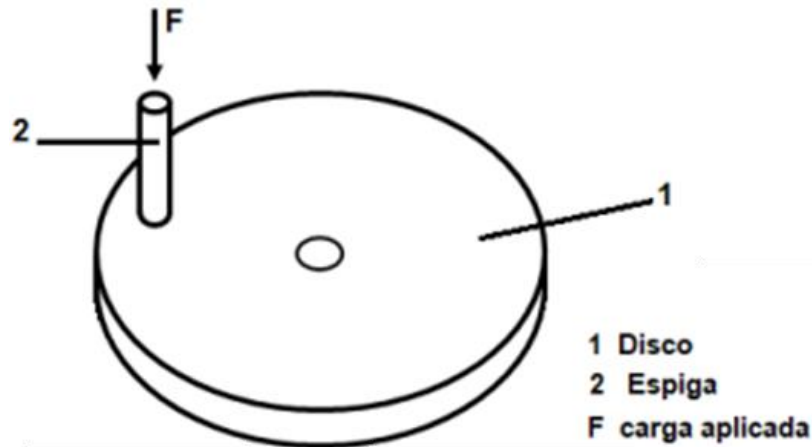


Fig. 1.8. Ensayo de espiga sobre disco.

### 1.3.2. NORMA ASTM PARA ENSAYOS DE DESGASTE

Los ensayos de desgaste con máquinas tipo espiga sobre disco están regidos por la norma de la ASTM G 99 [12], 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 [9].

Para el ensayo se requieren dos probetas, una con punta redondeada la cual se posiciona perpendicular a la otra probeta, la cual es un disco plano, la probeta de espiga con punta redondeada se coloca a una distancia con respecto centro de la probeta circular plana, para realizar un movimiento circular de una con respecto al otro, este giro puede ser realizado en un plano horizontal o vertical.

Para controlar la carga con la que se presiona la espiga contra el disco se puede hacer uso de un sistema mecánico (de palancas) un sistema hidráulico o un sistema neumático.

El grado de desgaste de cada probeta (tanto espiga como disco) se mide en milímetros cúbicos perdidos, de manera separada para cada una. En el caso de ensayar

dos materiales diferentes, se recomienda que cada material se examine tanto como espiga (pin) como también disco.

Para determinar el volumen de material perdido por la probeta existen dos opciones: medir las nuevas dimensiones de las probetas o utilizar una balanza para medir la diferencia en la masa perdida.

Para estandarizar mejor los datos, las mediciones se deben realizar en términos de distancia (ciclos de trabajo o revoluciones medidas con un sensor), presión y velocidad. 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 mostrar 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.

### 1.3.3. MÉTODOS PARA DETERMINAR EL DESGASTE

La manera más común de determinar el desgaste consiste en examinar los materiales antes y después del deslizamiento, cualquier diferencia en los materiales se le atribuye al desgaste [9].

Entre los métodos más utilizados en la determinación del desgaste se tienen los siguientes:

- a) **Método del peso:** Consiste en pesar el componente a examinar, para lo cual se debe limpiar cuidadosamente (generalmente se usan solventes como tricloroetileno o acetona) y luego pesarse.
- b) **Método de medición mecánica:** Utiliza un micrómetro con una precisión de aproximadamente  $10^{-3}$  cm, para realizar las mediciones necesarias y calcular el área afectada por la espiga. Este método es empleado cuando se estudia el desgaste en componentes de gran tamaño, como los cilindros de un motor de automóvil.

- c) **Método óptico:** Consiste en hacer una pequeña indentación con un microdurómetro en la superficie a estudiar y observar la reducción del tamaño de la indentación durante el deslizamiento.
- d) **Técnicas de radiotrazadores:** Son tan versátiles que permiten realizar varios experimentos. Con estas técnicas, se puede estudiar la dinámica del proceso de desgaste por deslizamiento. Por ejemplo, si se desliza un espécimen radiactivo sobre una superficie no radioactiva de mayor dureza, se formará una capa de residuos radiactivos en la superficie. Luego, se reemplaza el espécimen radiactivo por uno no radiactivo y se reinicia el deslizamiento. Al observar los residuos radiactivos con un radiotrazador, se nota que son reemplazados rápidamente de la superficie no radioactiva.

#### 1.4. DEPOSICIÓN AUTOCATALÍTICA Ni-P

Wurtz, en 1844, descubrió que el níquel puede ser depositado a partir de soluciones de sales mediante una reducción química con hipofosfito [13].

Sin embargo, los primeros depósitos metálicos brillantes de aleaciones de níquel y fósforo fueron obtenidos en 1911 por Breteau [14]. Durante un largo tiempo muchos investigadores se centraron más en la reacción que ocurría que en el recubrimiento en sí, y no fue hasta 1946 que Brenner y Riddell publicaron un artículo describiendo las condiciones adecuadas para obtener la deposición no electrolítica [15].

Los recubrimientos autocatalíticos de níquel se han vuelto muy populares con el tiempo debido a su proceso sencillo y su configuración relativamente económica. Con prácticamente innumerables combinaciones de aleaciones y compuestos que se pueden desarrollar, desde aplicaciones tan pequeñas como una aguja hasta estructuras tan complejas como vehículos espaciales.

En cuanto a los recubrimientos autocatalíticos de níquel formados a partir de baños de hipofosfito estos parecen tener una excelente resistencia a la corrosión y la abrasión. Además, se pueden reforzar mediante un ciclo de tratamiento térmico adecuado, lo que incrementa sus propiedades mecánicas [16].

### 1.4.1. COMPONENTES DE LAS SOLUCIONES AUTOCATALÍTICAS DE Ni-P

Las características químicas y físicas de un recubrimiento autocatalítico de níquel están intrínsecamente vinculadas a su composición, la cual, a su vez, se ve influenciada por la formulación y las condiciones operativas de la solución [17].

Los componentes principales del baño Ni-P y sus funciones se describen a continuación:

- **Una fuente de iones de níquel**

La fuente de níquel preferida es el sulfato de níquel, ya que otras sales de níquel, como el cloruro de níquel y el acetato de níquel se utilizan en aplicaciones muy limitadas. El cloruro puede ser perjudicial en ciertos casos, como cuando se utiliza el baño de niquelado EN para revestir aluminio o para proteger aleaciones ferrosas contra la corrosión. El acetato de níquel no ofrece ventajas significativas en términos de rendimiento del baño o calidad del depósito en comparación con el sulfato de níquel, y su costo más elevado lo hace menos atractivo. La sal de níquel de ácido hipofosforoso  $\text{Ni}(\text{H}_2\text{P}\text{O}_2)_2$  es la fuente ideal de iones de níquel, ya que elimina la adición de aniones de sulfato y minimiza la acumulación de iones de metal alcalino, mientras que reabastece los reactivos consumidos durante la deposición de metal [17].

- **Un agente reductor**

Para llevar a cabo la reducción química de los iones de níquel presentes en una solución autocatalítica, es posible utilizar agentes químicos basados en fósforo, boro o nitrógeno. Los agentes más utilizados para este propósito incluyen el hipofosfito, los borohidruros, los amino boranos y la hidracina [17].

Su función principal es reducir o precipitar controladamente los cationes del níquel de la solución sobre el sustrato, sin la necesidad de fuente de voltaje externa al sistema [17].

- **Agentes complejantes**

Los agentes complejantes, generalmente ácidos orgánicos o sus sales, se agregan a la solución de ENP para controlar la disponibilidad de los iones de níquel libres.

Las tres funciones principales que realizan los agentes complejantes en el baño autocatalítico son [17].

- ✓ Ejercen una acción amortiguadora que evita que el pH de la solución disminuya demasiado rápido;
- ✓ Evitan la precipitación de sales de níquel, por ejemplo, sales básicas o fosfatos; y
- ✓ Reducen la concentración de iones de níquel libres.

Cuando los iones de níquel libres se combinan con agentes complejantes, sus propiedades químicas en solución acuosa, como el color, el potencial de reducción y la solubilidad, se pueden ver alteradas [18].

- **Estabilizadores/inhibidores**

Una solución ENP puede funcionar en condiciones normales durante períodos prolongados sin añadir estabilizadores; sin embargo, se puede descomponer espontáneamente en cualquier momento. La descomposición del baño suele ir precedida de un aumento en el volumen de gas hidrógeno desprendido y la aparición de un precipitado negro finamente dividido en la mayor parte de la solución. Este precipitado consiste en partículas de níquel, y fosforo de níquel o boruro de níquel, dependiendo del agente reductor que se use [17].

Los estabilizadores son productos químicos que se agregan deliberadamente a las soluciones EN para evitar la reducción del níquel en la solución principal, lo que desencadena la descomposición aleatoria de todo el baño de recubrimiento. Es importante señalar que la cantidad de estabilizador en el baño de recubrimiento (expresada en mg/l o mol/l) es muy crítica para efectividad. Una adición insuficiente no puede prevenir la descomposición del baño, mientras que una adición excesiva detendrá completamente las reacciones de EN [18].

- **Energía**

La cantidad de energía requerida por el sistema es uno de los factores más importantes capaces de afectar la cinética y velocidad de las reacciones. La velocidad de deposición es generalmente muy lenta a temperaturas por debajo de 65 °C, aunque incrementa rápidamente con el incremento de la temperatura. En el caso de soluciones reducidas con hipofosfito de sodio, la composición de los depósitos de níquel-fósforo varía según la temperatura: a mayor temperatura, disminuye el contenido de fósforo, y a menor temperatura, este contenido aumenta [18].

#### 1.4.2. PRINCIPALES VARIABLES QUE AFECTA EL PROCESO DE DEPOSICIÓN AUTOCATALÍTICA Ni-P

Existen diversas variables que influyen en el proceso de deposición, tales como la temperatura, el pH, la concentración de hipofosfito, la carga de la solución, la agitación y el envejecimiento de la solución. De todos estos parámetros, la temperatura y el pH, así como la concentración del estabilizador utilizado en la solución son los que más influyen en la velocidad de deposición [19].

- **Temperatura**

La temperatura a la que ocurre la reacción de deposición de níquel-fósforo (ENP) es la principal variable que determina la velocidad de la reacción [17]. La velocidad de recubrimiento aumenta exponencialmente cuando aumenta la temperatura [20], tal como se presenta en la Fig. 1.9.

Es importante tener en cuenta que, aunque la velocidad de deposición se incrementa al aumentar la temperatura de la solución, ésta puede alcanzar su punto de ebullición, perder la estabilidad o incluso descomponerse.

Cabe mencionar que el contenido de P de los depósitos de EN disminuye con el aumento de la temperatura de operación y, por lo tanto, influye en las propiedades de los depósitos de EN, siempre y cuando se mantengan constantes todas las demás variables [21].

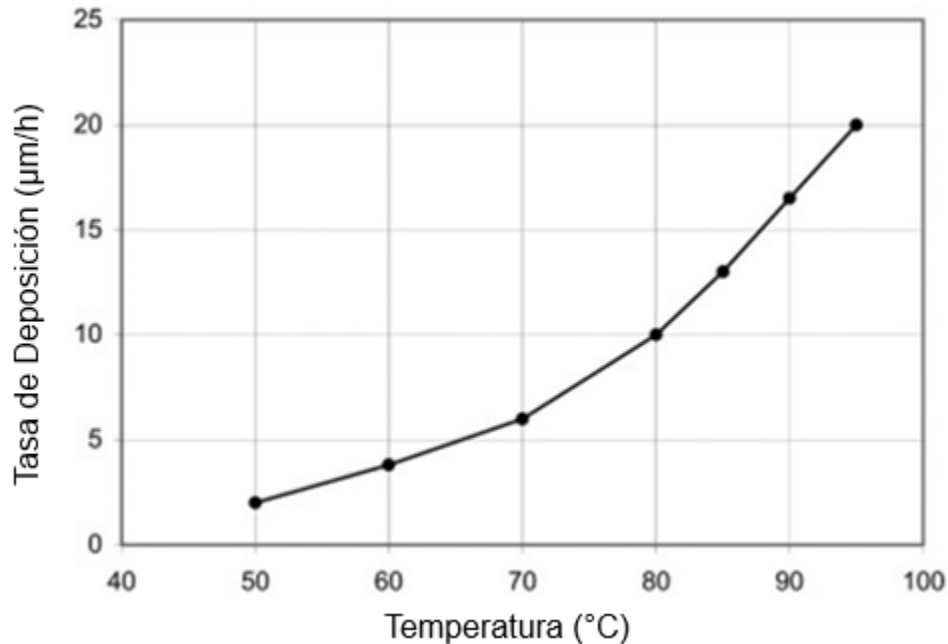


Fig. 1.9. Efecto de la temperatura de la solución en la tasa de deposición [20].

- **pH**

El efecto del pH sobre el contenido de fósforo en el recubrimiento es más pronunciado que el efecto de la temperatura. Un aumento en el pH de la solución conduce a la aceleración de la reacción de reducción de níquel, aunque retrasa la autorreducción del fósforo del hipofosfito, ya que se generan iones hidróxido en el caso de este último. Por lo tanto, los depósitos desarrollados a partir de baños de pH alto generalmente tienen un bajo contenido de fósforo. Sin embargo, debido a que la reacción de reducción de níquel controla predominantemente la velocidad de deposición, el aumento del pH de la solución aumenta la velocidad de deposición [17].

Elevar el pH del baño tiene los efectos siguientes [22]:

- 1) Incrementar la tasa de deposición de forma casi lineal;
- 2) Modificación de la reacción del hipofosfito de catalítica a homogénea. Una consecuencia de esto puede ser la descomposición espontánea de la solución con deposición de níquel;
- 3) Reducir la solubilidad del fosfato de níquel. La deposición de este componente no deseado puede iniciar la descomposición y, a menudo, conduce a depósitos rugosos;  
y
- 4) Reducir el contenido de fósforo del yacimiento.

La disminución de pH puede conducir a [22]:

- 1) Prevenir la deposición de sales básicas y de hidróxidos;
- 2) Disminución del poder reductor del hipofosfito;
- 3) Una amortiguación más efectiva de especies en la solución; y
- 4) Un valor de pH por debajo de 4, produce una reducción en la velocidad de deposición.

El valor del pH seleccionado para una solución ácida debe asegurar una velocidad mínima de deposición y la estabilidad de la solución, para una utilización óptima de hipofosfito [17].

En la Fig. 1.10 se presenta el efecto del pH de la solución tanto en la tasa de deposición como en el contenido de fósforo [23].

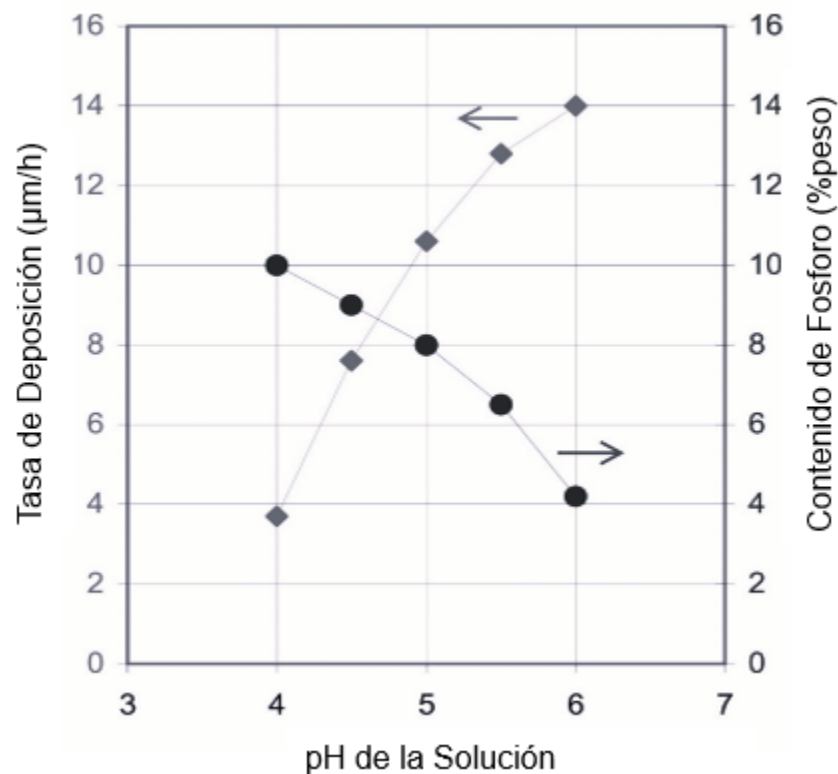


Fig. 1.10. Efecto del pH de la solución sobre la tasa de deposición y el contenido de fósforo del recubrimiento [23].

- **Composición del baño**

La concentración de Ni, así como la relación  $\frac{Ni^{++}}{H_2PO_2^-}$  son dos parámetros importantes que afectan la tasa de deposición, Según los estudios realizados [21].

- a) La concentración de hipofosfito debe estar entre 0.15 y 0.35 mol//, y
- b) La relación óptima  $\frac{Ni^{++}}{H_2PO_2^-}$  se debe mantener entre 0.25 y .035 mol//.

El efecto de la concentración de hipofosfito sobre la tasa de recubrimiento y la composición del depósito es más significativo en comparación con la concentración de níquel. En general, el aumento de la concentración de hipofosfito en la solución de ENP da como resultado un aumento en la tasa de deposición de níquel y el contenido de P en el depósito de EN [24].

- **Agitación**

Aunque la agitación de la solución o el movimiento de las piezas a recubrir no es absolutamente necesario para la deposición de Ni-P, es usualmente recomendable que se realice. Esto se debe a que aumenta la homogenización de la solución, mejora la convección y facilita el transporte de los reactantes a la superficie de trabajo a ser recubierta [19].

Se ha reportado que la velocidad de deposición en soluciones ácidas se incrementa con la agitación, manteniendo constantes las demás condiciones [25]. Esto puede ser explicado en términos de un incremento de  $pH$  dentro de la película de fluido adyacente al sustrato, donde se produce la difusión de átomos.

La forma más común para producir la agitación de soluciones de “electroless”, es mediante la inyección de aire (por medio de bombeo), recirculación de la solución del baño o por el movimiento de las partes a ser recubiertas [22].

### **1.4.3. APLICACIONES DEL PROCESO DE RECUBRIMIENTO AUTOCATALÍTICO DE Ni-P**

La aplicación del proceso de recubrimiento autocatalítico de Ni-P ha sido ampliamente desarrollada debido a su versatilidad para aplicarse a materiales tanto conductores como también no conductores, así también a piezas de formas simples o complejas. Sus aplicaciones se clasifican en dos tipos [22]:

- a) En términos del sector industrial con el que se relaciona la pieza a recubrir; y

b) En función del material a recubrir (sustrato) en el cual se deposita el recubrimiento autocatalítico de Ni-P; así, los plásticos, aceros, aluminios y diversas aleaciones que frecuentemente son usadas como sustrato podrían formar la base para dicha clasificación.

En esta sección se especifican varias aplicaciones de este procedimiento, tomando como base la clasificación en función de los sectores industriales, nombrando algunos ejemplos y espesores de recubrimiento típicos usados en cada uno de ellos.

Aspectos importantes para su aplicación. Los aspectos que motivan realizar aplicaciones de esta técnica son muchos, entre los cuales se pueden citar [17]:

- a) Se puede recubrir materiales no conductores, lo cual brinda una gran ventaja respecto a los procesos electrolíticos convencionales. Esto se logra con una adecuada y particular activación de la superficie para cada caso. La aplicación de estos recubrimientos puede ser para uso industrial o para decoración.
- b) Sustratos como el aluminio y acero pueden ser recubiertos con esta técnica permitiendo mejorar sus propiedades superficiales, como la resistencia a la corrosión, lo cual permite disponer de sustitutos de los aceros inoxidable, los cuales son costosos y muy difíciles de maquinar.
- c) Materiales utilizados como sustratos relativamente blandos, con baja resistencia a la abrasión, pueden ser recubiertos con el fin de incrementar su dureza y tener una mayor resistencia superficial.
- d) Facilita el recubrimiento de piezas con formas complejas.
- e) Algunos sustratos pueden incrementar su soldabilidad, usando el proceso autocatalítico de Ni-P.

## **1.5. ENSAYOS DE DESGASTE EN RECUBRIMIENTOS AUTOCATALÍTICOS DE Ni-P**

Una de las ventajas distintivas de la deposición de níquel sin electricidad es su resistencia superior al desgaste en los recubrimientos. En teoría, existe una correlación entre la resistencia al desgaste y la dureza de una superficie. Sin embargo, las

propiedades de desgaste de una superficie se ven afectadas por varios parámetros adicionales, como la naturaleza de la tensión aplicada y la morfología de la superficie.

La resistencia al desgaste de los depósitos autocatalíticos de níquel depende tanto del contenido de fósforo como del tipo de tratamiento térmico posterior aplicado. El tratamiento térmico tiene el efecto de mejorar la dureza y, en consecuencia, la resistencia al desgaste del recubrimiento. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, a temperaturas de tratamiento térmico más altas, el crecimiento del grano puede tener un impacto negativo en la resistencia al desgaste.

### **1.5.1. ENSAYO 1. COMPORTAMIENTO AL DESGASTE DE RECUBRIMIENTOS AUTOCATALÍTICOS DE Ni-P y DE Ni-P CON $Al_2O_3$**

En este caso se investigó los efectos de las partículas de alúmina depositadas y la temperatura de tratamiento térmico sobre la dureza y la resistencia al desgaste de la matriz de revestimiento de Ni-P y se ha realizado una comparación entre los recubrimientos autocatalíticos de Ni-P y Ni-P con  $Al_2O_3$ . La resistencia al desgaste de los depósitos se midió mediante el método de espiga sobre disco.

Los sustratos fueron discos de acero SAE 1045 normalizados de 4 cm de diámetro y 5 mm de espesor. Todas las probetas se prepararon hasta con papel lija de SiC grado 600 y luego se pretrataron con baño alcalino y acetona con enjuagues intermedios con agua. El baño autocatalítico de Ni-P que contiene 7 g/l de níquel y 30 g/l de  $H_2PO_2^-$  y cantidades adecuadas de aditivo y estabilizador. El baño se agitó a 300 rpm, utilizando un sistema de agitación magnética y un imán revestido de PTFE de 7.5 cm de largo y 2.5 mm de diámetro. El proceso de deposición sin electricidad se llevó a cabo en un recipiente de vidrio de 600 ml y a una temperatura de  $88 \pm 2$  °C.

Después de preparar el baño y agregar partículas de  $Al_2O_3$  (5 - 15  $\mu m$  de tamaño), se realizó la co-deposición de partículas de alúmina con 15 g/l en el baño en 90 min. Este proceso de deposición también se llevó a cabo sin la existencia de partículas. Se usó tratamiento térmico isotérmico a 200, 400 y 600 °C durante 1 h para determinar la dureza y la resistencia al desgaste de los depósitos.

Así, se realizaron pruebas de desgaste espiga sobre disco a una carga normal de 30 N y una velocidad de deslizamiento de 0.05 m/s para evaluar la resistencia al desgaste de los recubrimientos. Las pruebas de desgaste se realizaron contra espigas de acero SAE 52100 para una distancia de deslizamiento de unos 1,000 m, sin lubricación a 25 °C y en un aire con una humedad relativa del 30 %.

En la Fig. 1.11 se presenta que la resistencia al desgaste de los depósitos autocatalíticos de Ni-P y Ni-P con Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, respectivamente, aumenta hasta llegar a tratamiento de 400 °C y luego disminuye cuando el tratamiento térmico es a 600 °C.

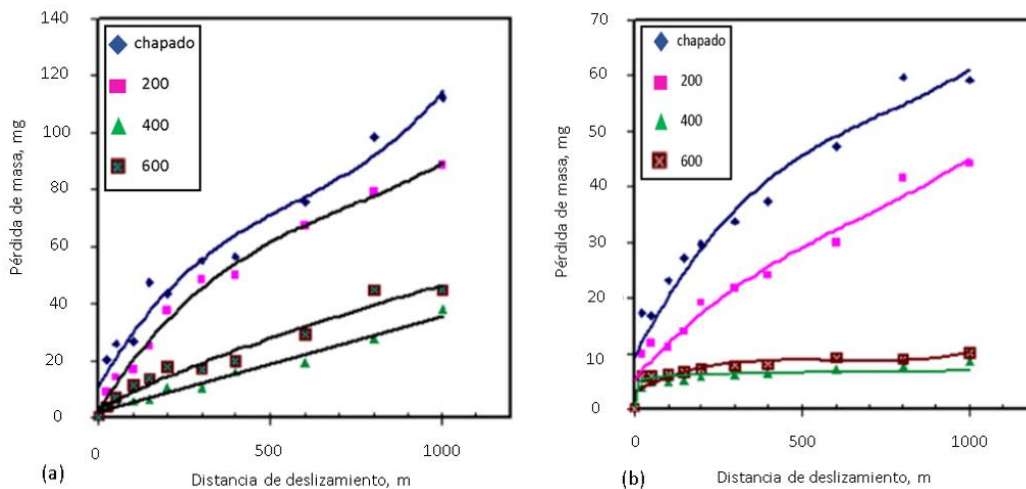


Fig. 1.11. Efecto de la temperatura de post-tratamiento térmico sobre la resistencia al desgaste de los recubrimientos: a) De Ni-P; y b) de Ni-P con Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [26].

La comparación de los datos de desgaste entre los recubrimientos autocatalíticos de Ni-P y Ni-P con Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> resulta que la co-deposición de partículas de alúmina en la matriz de Ni-P mejora la resistencia al desgaste de la matriz de Ni-P.

Parece que existe una relación directa entre la dureza y la resistencia al desgaste, lo que lleva a que un mecanismo de desgaste operativo sea la abrasión. Además, la aparición de superficies de desgaste y desechos en los recubrimientos metalizados presenta que el desgaste por adhesión podría ser un mecanismo de desgaste adicional.

En los recubrimientos compuestos, la mala unión entre la matriz y las partículas podría contribuir a la extracción de las partículas y, sin embargo, la existencia de partículas duras atrapadas en la interfaz de las superficies deslizantes podría intensificar la destrucción por desgaste.

En las Figs. 1.12 y 1.13 se presentan imágenes obtenidas mediante Microscopía Electrónica de Barrido y Espectroscopía por Dispersión de Energía (EDS) a cada una de las probetas con PTT a 200 °C.

En las Figs. 1.12 y 1.13 se observa que el contenido de hierro en los desechos de recubrimiento autocatalítico de Ni-P es mayor que el de los desechos de recubrimiento autocatalítico de Ni-P con Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Esto podría ser causado por el deslizamiento entre las superficies más lisas del recubrimiento autocatalítico de Ni-P y la espiga de acero, lo que provoca oxidación y/o desgaste por adhesión además del mecanismo abrasivo.

Se ha informado que el desgaste por abrasión es el mecanismo de desgaste más importante en otros recubrimientos compuestos que contienen partículas duras.

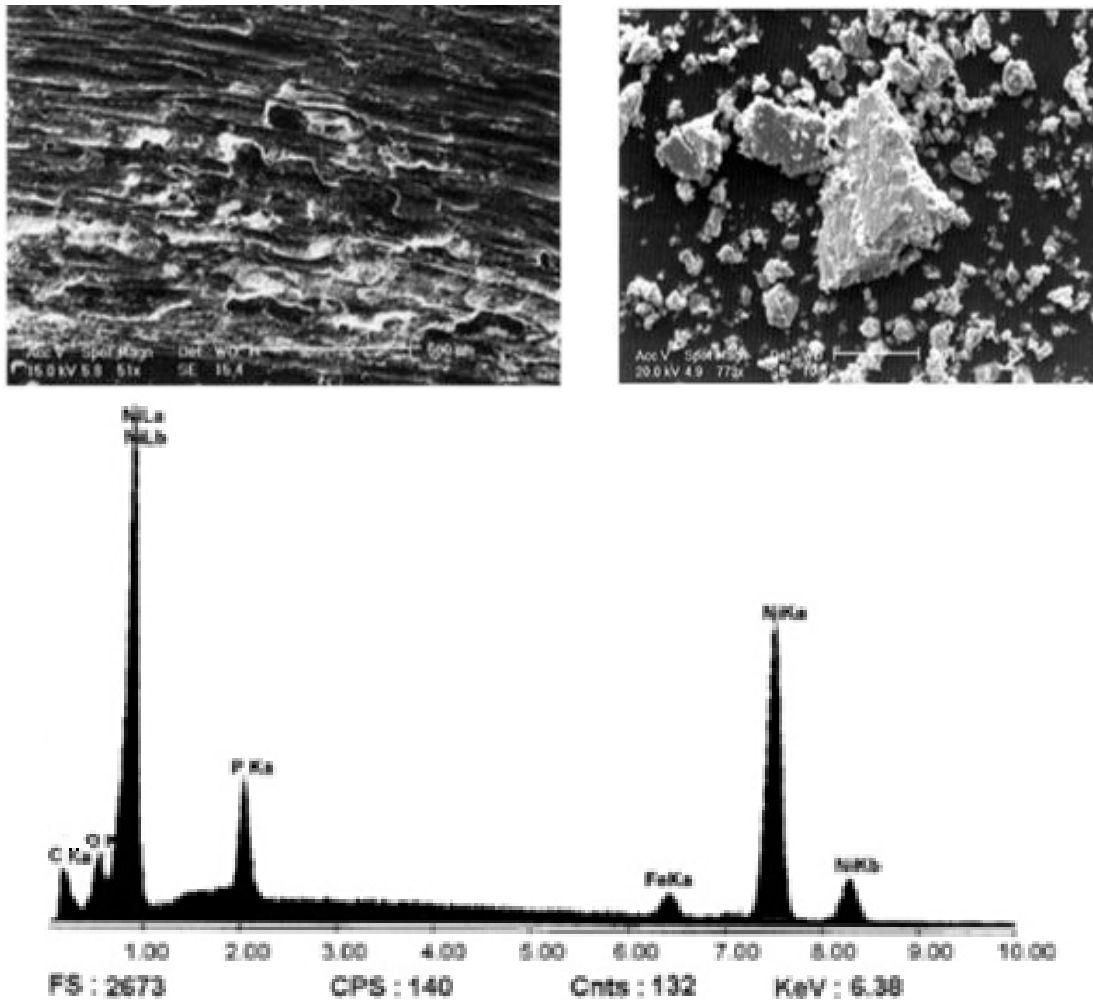


Fig. 1.12. Micrografías de superficies de desgaste y residuos y análisis EDX de residuos de desgaste de un recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PTT a 200 °C [26].

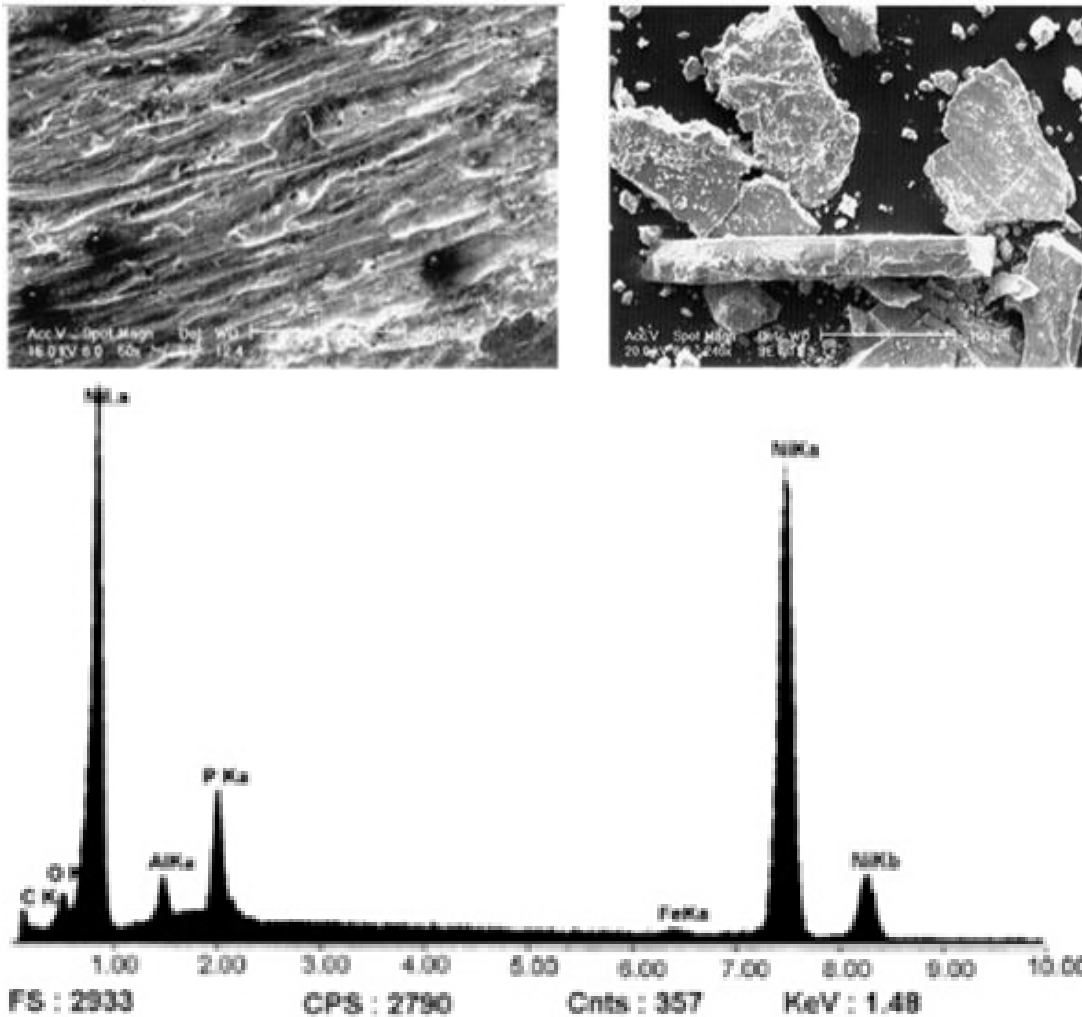


Fig. 1.13. Micrografías de superficies de desgaste y residuos y análisis EDX de residuos de desgaste de un recubrimiento autocatalítico de Ni-P con  $\text{Al}_2\text{O}_3$  con PTT a 200 °C [26].

### 1.5.2. ENSAYO 2. MECANISMO DE DESGASTE DE LOS RECUBRIMIENTOS AUTOCATALÍTICOS COMPUESTOS DE Ni-P-BN(h)

En este estudio se realizaron experimentos de desgaste por deslizamiento a temperatura ambiente, utilizando una configuración espiga sobre disco, para estudiar el mecanismo de desgaste de recubrimientos compuestos autocatalíticos Ni-P-BN(h) depositados sobre acero inoxidable SAE 316L. Se obtuvieron recubrimientos con 11, 35, 45 y 67 % vol. de BN(h), dispersando el BN(h) con un tamaño de partícula promedio de

5.16  $\mu\text{m}$  en un baño autocatalítico basado en hipofosfito de sodio, con agitación mejorada y adición de surfactante. Se emplearon técnicas de microscopía electrónica de barrido y perfilometría 3D para estudiar las cicatrices de desgaste [27].

El polvo de BN(h), producido comercialmente por Sintec Keramik Ltd (Reino Unido), con un tamaño de partícula promedio de 5.16  $\mu\text{m}$ , se pretrató mezclándolo con un dispersante coloidal y la solución de revestimiento mediante agitación magnética (30 min).

Se llevaron a cabo pruebas espiga sobre disco para determinar la fricción, la resistencia al desgaste y el mecanismo de desgaste de los recubrimientos. Las pruebas se realizaron en condiciones no lubricadas en aire con una humedad relativa de  $50 \pm 2$  % y una temperatura ambiente de  $24 \pm 1$  °C. La espiga de 6 mm de diámetro, fabricado en SAE 52100, se cargó con una fuerza normal de 2 N contra las probetas del disco que giraban con una velocidad de deslizamiento de  $0.1 \text{ ms}^{-1}$ . El radio de contacto fue de 3 mm y la distancia de deslizamiento fue de 1,000 m.

La microscopía electrónica de barrido se realizó utilizando un Hitachi S400, y la perfilometría 3D con un New Zygo 2000, para determinar el mecanismo de desgaste de los recubrimientos.

Se realizaron cinco pruebas para cada combinación espiga-disco y se reportaron los resultados promedio.

Los resultados obtenidos indican que, en el caso de recubrimientos con contenido de BN(h) superior al 11 % vol, el mecanismo de desgaste es un mecanismo de desgaste adhesivo suave (arado adhesivo) con alta deformación plástica de los recubrimientos y baja transferencia del recubrimiento a la bola. Los recubrimientos con 11 % vol. de BN(h) presentan un mecanismo mixto de desgaste adhesivo y abrasivo.

## **2 DISEÑO EXPERIMENTAL**

En este capítulo se presenta cada etapa a realizar en el desarrollo del estudio de desgaste tipo espiga sobre disco, la primera etapa de dicho proceso comprende el dimensionamiento y maquinado de los discos.

Luego se sometieron a la deposición autocatalítica de Ni-P, y posteriormente se aplicó el respectivo post-tratamiento térmico.

Finalizando con la descripción del proceso del ensayo de desgaste que se realizó, así como información acerca del uso de la máquina para el ensayo de desgaste tipo espiga sobre disco donde se realizarán los ensayos a diferentes distancias de deslizamiento.

### **2.1. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

Es necesario representar de forma sistemática y ordenada las etapas que se deben seguir para desarrollar el experimento. Es por ello, que se ha hecho uso de un flujograma (ver Fig. 2.1), donde se presentan las etapas realizadas, iniciando con el dimensionamiento necesario de los discos y las espigas, así como su maquinado, continuando con la descripción de todas las etapas del proceso para la obtención de los discos listos para ser ensayadas, la realización de los ensayos y obtención de resultados.

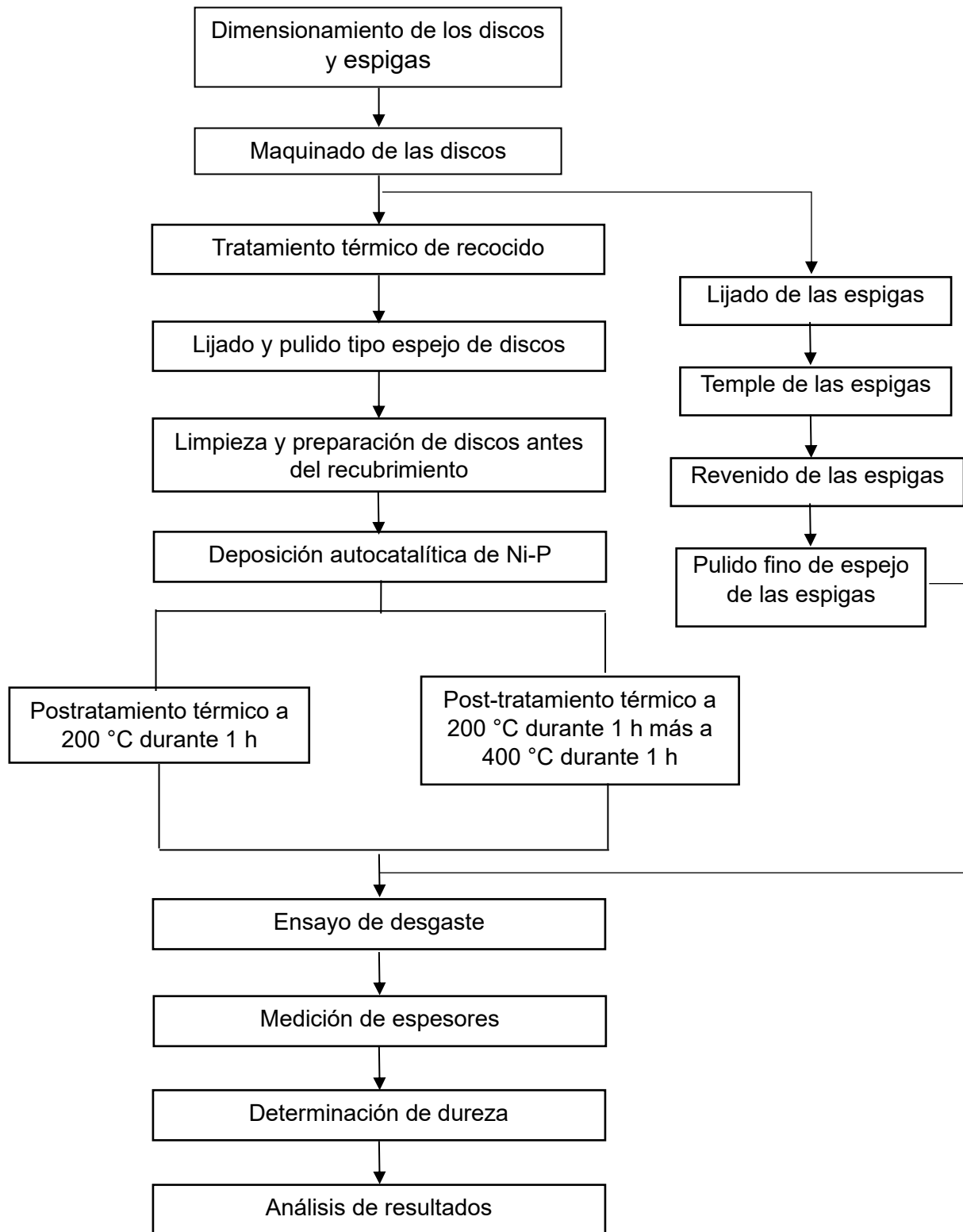


Fig. 2.1. Flujo de la metodología experimental.

## 2.2. DIMENSIONAMIENTO DE LOS DISCOS PARA ENSAYO DE DESGASTE

El dimensionamiento de los discos y las espigas se realizó tomando en consideración el manual del módulo para ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco marca GUNT, modelo TM 260.3. Dicho aparato se utilizó con el módulo básico de estudios tribológicos de la misma marca, modelo TM 260. En la Fig. 2.2 se presenta las dimensiones tanto del disco de acero SAE 1020, como también de la espiga de acero SAE O1; el disco posee un diámetro de 50 mm y un espesor de 10 mm, tiene un chaflán en ambas caras de 1 mm a 45° y un agujero centrado de 4.37 mm; dicho agujero permite la sujeción del disco al vaso portador del mismo, mediante un perno, además existe holgura entre el perno y el disco, por lo que no es necesario realizar un ajuste. La espiga posee un diámetro de 4 mm y una longitud de 25 mm. En la Fig. 2.3 se puede observar ambas piezas en un modelado 3D.

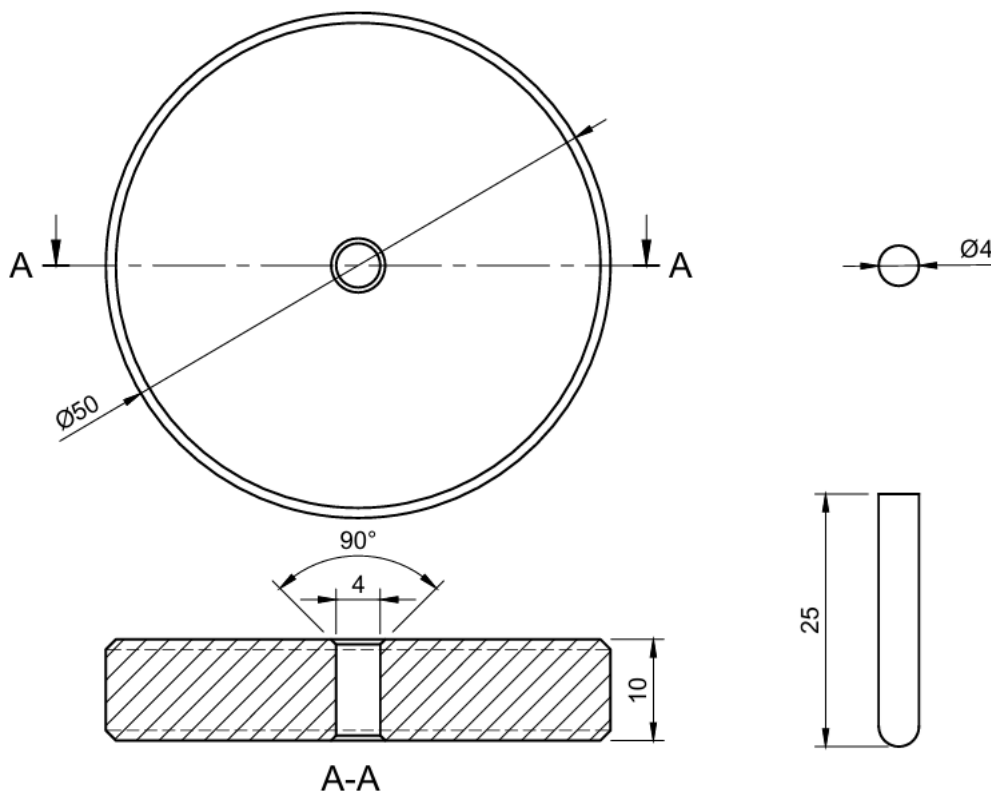


Fig. 2.2. Dimensiones de los especímenes utilizados en el ensayo tipo espiga sobre disco: a) Disco; y b) espiga. Cotas en mm.

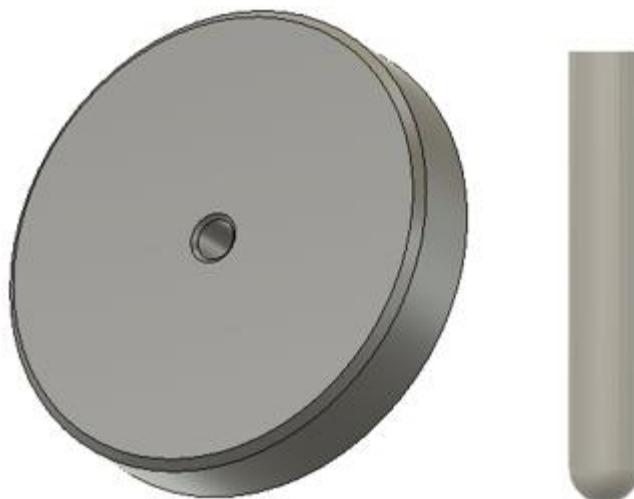


Fig. 2.3. Probeta disco, modelo 3D: a) Disco; y b) espiga.

### 2.3. MAQUINADO DE LOS DISCOS

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

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

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

El maquinado de los discos se lleva a cabo en un torno convencional marca COMEC, modelo TGA 180 N, que se encuentra en la Unidad Productiva Metal Mecánica, ubicada en Escuela de Ingeniería Mecánica.

El maquinado de los discos se inicia realizando un proceso de cilindrado (ver Fig. 2.4) para obtener el diámetro de 50 mm a partir de los 50.80 mm originales de la barra. Luego se procedió a realizar cortes sobredimensionados de los discos a 15 mm de espesor, utilizando una sierra industrial (ver Fig. 2.5).

Posteriormente, se perforó un agujero a través del disco con una broca de 4.36 mm o 11/64 pulg (ver Fig. 2.6) y luego, en el torno se refrentaron ambas caras (ver Fig. 2.7).



Fig. 2.4. Cilindrado de la barra de acero SAE 1020.

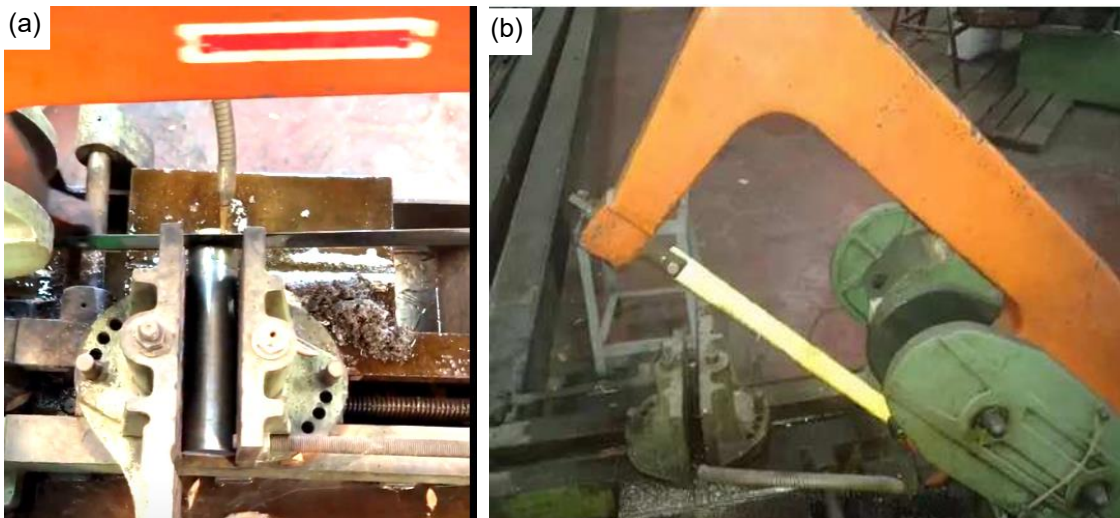


Fig. 2.5. Proceso de corte: a) Corte de discos; y b) sierra industrial.

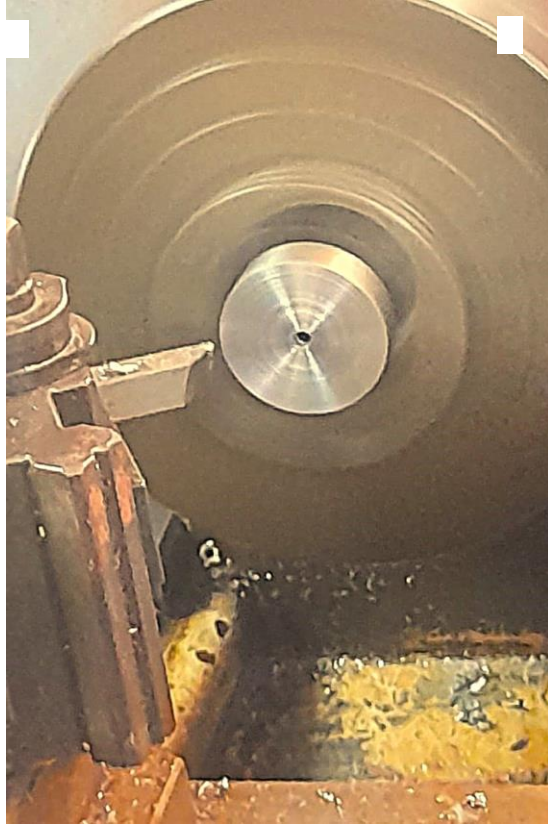


Fig. 2.6. Proceso de taladrado de los discos.



Fig. 2.7. Proceso de refrentado de las caras.

Con las caras ya refrentadas procedemos a realizar el biselado de los discos (ver Fig. 2.8) u una vez finalizado el biselado los discos se colocaron en un recipiente con aceite para protegerlos de la oxidación.



Fig. 2.8. Proceso de biselado de los discos.

Posteriormente se realizó el rectificado de los discos en una rectificadora marca CHEVALIER modelo FSG-618M (ver Fig. 2.9), la cual se encuentra la Unidad Productiva Metal Mecánica, ubicada en esta Escuela de Ingeniería Mecánica.



Fig. 2.9. Proceso de rectificado: a) Rectificadora; y b) probeta siendo rectificada.

El procedimiento comienza conectando la rectificadora y asegurando que la mesa magnetizable esté limpia y libre de impurezas. Se coloca la pieza y se magnetiza, ajustando el nivel de magnetización entre 80 y 90 %. Luego, se regulan los bloques para limitar el movimiento longitudinal de la mesa y se preparan las mangueras del sistema de refrigeración antes de encender el husillo y la muela.

Para el rectificado, se comienza acercando la muela al centro de la pieza hasta que haga contacto, deslizando la mesa hacia la izquierda hasta que la muela deje de tocar la superficie. Luego, se realizan movimientos longitudinales de izquierda a derecha a lo largo de la pieza. Después de cada barrido, se realiza un avance transversal de 3 mm para cubrir toda la superficie. Si es necesario, se puede encender la bomba de refrigeración y ajustar el caudal con la válvula de bola para mantener la pieza y la muela a una temperatura óptima. Además, se ajusta una profundidad de corte de 0.025 mm, repitiendo los barridos hasta lograr la medida deseada en toda la superficie.

Una vez terminado el proceso de rectificado, se procede a detener el husillo y esperar a que la muela se detenga completamente. Se cierra el flujo del refrigerante, y la

pieza se desmagnetiza presionando el botón correspondiente y ajustando la perilla a cero. Después de esperar a que termine el ciclo de desmagnetización, que se indica cuando el botón rojo se apaga, se retira la pieza de la mesa magnetizable, completando así el procedimiento.

#### **2.4. TRATAMIENTO TÉRMICO DE RECOCIDO DE ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES DE LOS DISCOS**

El tratamiento térmico que se realizó al sustrato fue un recocido de alivio de esfuerzos residuales con el propósito de eliminar los posibles esfuerzos residuales que se generaron durante el maquinado de los discos.

En la Fig. 2.10. se presenta un esquema del tratamiento térmico de recocido de alivio de esfuerzos residuales, el cual se realizó en una cámara para tratamientos térmicos de atmósfera inerte de argón.

A continuación, se describe brevemente el procedimiento que se realizó: se colocaron los discos en el interior de la cámara de atmosfera inerte, se cierra herméticamente esta cámara instalándole adecuadamente el empaque y la abrazadera de sujeción, luego la cámara se introduce en el horno.

Posteriormente, al horno se le ubicó una tapa removible de fibra de cerámica que ayuda a cerrar herméticamente el horno, una vez lista la instalación de la cámara se acopla la manguera de alimentación del cilindro de argón, posteriormente se le suministró un flujo de argón durante un tiempo, hasta purgar todo el aire que se encuentra dentro de la cámara, posteriormente se cerró la válvula de drenaje para así llenar la cámara con argón y crear la atmósfera inerte.

A continuación, se inició la etapa de calentamiento y se comenzó a medir la temperatura del interior de la cámara con el sensor de temperatura integrado en la tapadera de la cámara para así monitorear que se llegue a la temperatura deseada de la forma adecuada.

El tratamiento térmico se realizó a una velocidad de calentamiento de 200 °C/h, a una temperatura de mantenimiento de 550 °C, durante un tiempo de permanencia de 20 minutos, al finalizar este tiempo los discos se dejaron enfriar en el horno.

Para facilitar la extracción de los discos de la cámara el tratamiento térmico se realizó en 4 grupos de 5 discos y 1 grupo de 4 discos.

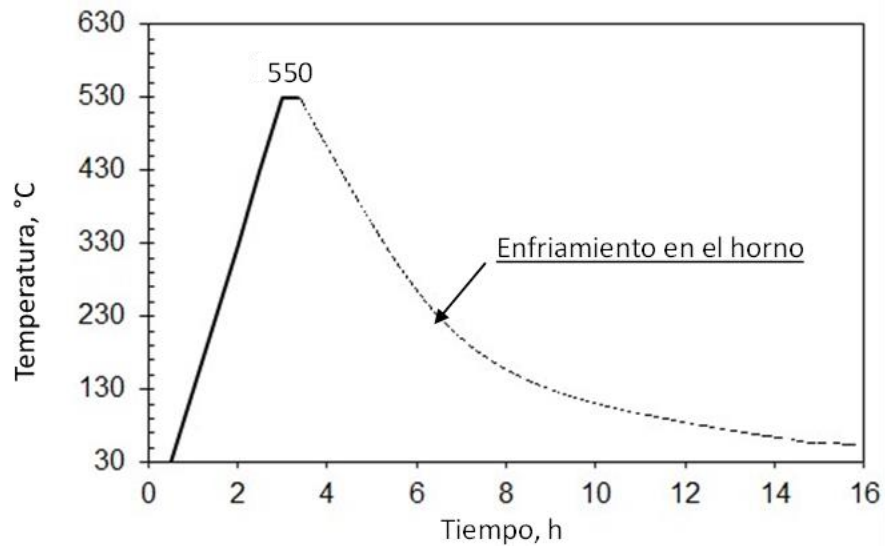


Fig. 2.10. Esquema del tratamiento térmico de recocido de alivio de esfuerzos residuales para un acero SAE 1020.

## 2.5. TRATAMIENTO TÉRMICO DE LAS ESPIGAS

Las espigas de acero SAE O1 fueron sometidas a un tratamiento térmico de temple y revenido; en la Fig. 2.11. se observa la curva de temperatura – tiempo correspondiente al tratamiento térmico de las espigas.

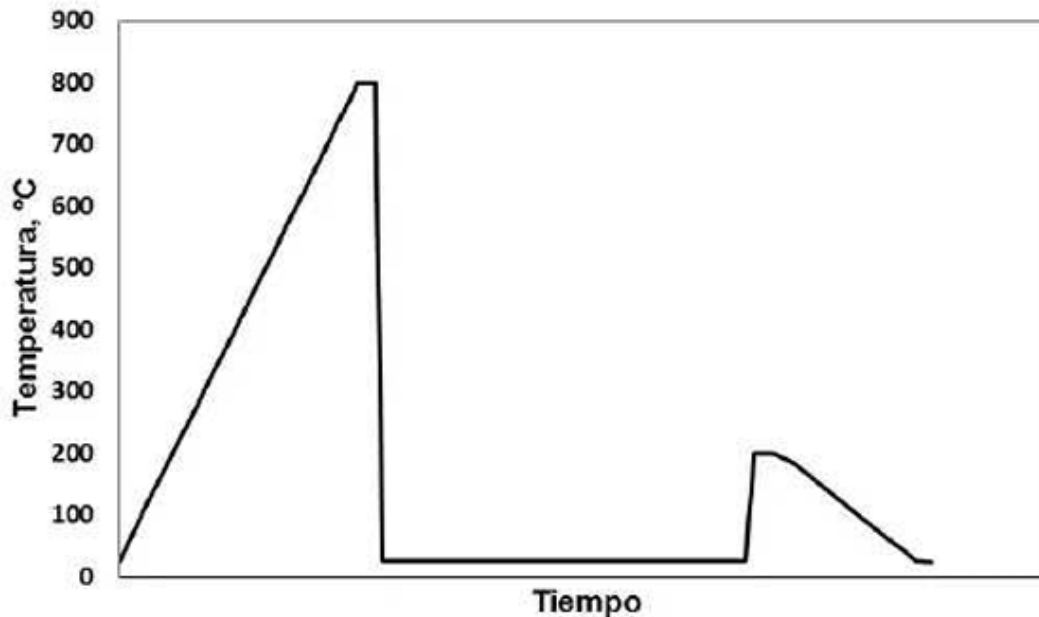


Fig. 2.11. Curva de variación temperatura vs tiempo para el tratamiento térmico de temple y revenido de las espigas de acero SAE O1.

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. 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.

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.

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

El tratamiento térmico de temple y revenido de las 42 espigas se realizó en un solo lote, para ello se prepararon 6 grupos de 7 espigas cada uno, sujetas con alambre de

amarre. La temperatura de austenización para un acero SAE O1 es de 800 °C y de acuerdo a la relación de tiempos de mantenimiento para una sección de 4 mm el tiempo de mantenimiento a la temperatura dada fue de 20 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 fueron 12 minutos. Así, una vez cumplidos los 12 minutos las espigas se extraen de la cámara del horno para un enfriamiento al aire libre.

## **2.6. LIJADO Y PULIDO DE DISCOS**

Previo a la deposición del recubrimiento autocatalítico de Ni-P, se procedió a lijar y pulir tipo espejo Los discos. Esta etapa es fundamental para garantizar la uniformidad y la calidad de la superficie para que la deposición se efectuó de la mejor manera. Para los discos, se sigue un procedimiento de lijado. Se comienza utilizando una hoja de papel de lija de carburo de silicio (SiC) con un número de grano 100. Esta primera etapa de lijado tiene como objetivo principal eliminar cualquier irregularidad superficial y garantizar una base uniforme para las etapas posteriores.

Una vez completada la fase inicial con la hoja de grano 100, se procede con hojas de papel de lija de menor grado de aspereza, desde la 200 a la 1200. Estas hojas menos bastas refinan aún más la superficie, eliminando cualquier marca o imperfección remanente de la etapa inicial de lijado. Finalmente, se lleva a cabo la etapa de acabado utilizando una hoja de papel de lija de grano 1,500, la más fina de todas. Esta etapa de lijado fino asegura un lijado tipo espejo listo para realizar la deposición.

## 2.7. DEPOSICIÓN DEL RECUBRIMIENTO AUTOCATALÍTICO DE Ni-P

El propósito de esta etapa del trabajo, es disponer de un grupo de 24 discos recubiertos con depósitos autocatalíticos de Ni-P, conduciendo el proceso de deposición durante 120 min, a una temperatura de  $70 \pm 2$  °C teniendo en consideración que el proceso de calentamiento de la solución se debe realizar a una velocidad de 10 °C/h y alcanzar y mantener un pH de  $8 \pm 0.2$ .

Si la velocidad de calentamiento es muy rápida la solución podría colapsar formando grumos, la cual se vuelve inservible, al igual que si el pH disminuye la velocidad de deposición se volvería más lenta, para controlar este último factor se agrega hidróxido de potasio (KOH) a la solución con el propósito de mantener el grado de acidez deseado.

Los equipos utilizados para la obtención de los depósitos autocatalíticos de Ni-P están ubicados en el Laboratorio de Tratamientos Térmicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

El sistema para la deposición autocatalítica de recubrimientos de Ni-P se presenta en la Fig. 2.12 [28]. Así, en conjunto con el sistema se tienen otros equipos para censar las variables que se deben de controlar y para la realización de las pruebas iniciales como el caso de un medidor de pH digital con precisión de  $\pm 0.01$ , un termómetro digital y otro de mercurio para tener un mejor control de la temperatura y así minimizar los errores en las lecturas.



Fig. 2.12. Sistema para la deposición auto catalítica de recubrimientos de Ni-P.

Antes de realizar las deposiciones, se realizaron algunos ensayos en un vaso Beaker de vidrio de 500 ml de capacidad (ver Fig. 2.13), sumergido en agua o baño de maría para simular a pequeña escala las condiciones que se tuvieron durante las deposiciones para así tener una mejor comprensión del proceso y observar de primera mano cómo afectan las distintas variables durante el proceso.



Fig. 2.13. Ensayo en un vaso Beaker de 500 ml.

A continuación, se presenta una breve explicación tal como se realizó el proceso de deposición.

### **2.7.1. PASIVACIÓN DE LOS ELEMENTOS EN CONTACTO CON LA SOLUCIÓN**

Antes de realizar cada deposición se pasivan los elementos que estarán en contacto con la solución de Ni-P, si esto no se hace hay una gran probabilidad que la solución se deposite sobre ellos, estos elementos para el caso presentado en este trabajo son la bandeja de acero inoxidable y la sección sumergible de la unidad calentadora y de agitación.

Esta pasivación se hizo con una solución de ácido nítrico al 15 %, esto se hizo para la cámara y el elemento recirculador. Posteriormente estos elementos se enjuagaron con agua destilada varias veces hasta que el pH del agua sea igual al del agua destilada sin utilizar.

## 2.7.2. PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN AUTOCATALÍTICA DE Ni-P

La solución autocatalítica de Ni-P utilizada está compuesta por cuatro elementos básicos, los cuales en concentraciones y fórmula se presentan en la Tabla 2.2 [29], estos valores son propuestos en algunas investigaciones en el área de recubrimientos autocatalíticos de Ni-P que utilizan baños básicos [28 y 30].

Tabla 2.2. Reactivos necesarios para preparación de solución autocatalítica de Ni-P [29].

Nombre	Fórmula	Concentración, g/l
Cloruro de Níquel	$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	21
Hipofosfito de Sodio	$\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	24
Cloruro de Amonio	$\text{NH}_4\text{Cl}$	30
Citrato de Sodio	$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$	45

El proceso inició por la preparación de la solución, en cantidades de 1 l, para este fin se utilizó un vaso Beaker de 1 l de capacidad, una balanza digital portátil (ver Fig. 2.14) que sirvió para medir la masa de cada uno de los reactivos, un Hot Plate marca Fisher Scientific (ver Fig. 2.15).

El proceso de preparación de la solución autocatalítica de Ni-P es el siguiente, se vertió 400 ml de agua destilada en un vaso Beaker graduado de 1 l de capacidad, luego se agrega dentro del vaso Beaker cada uno de los reactivos, Para medir las cantidades a utilizar se utilizó la balanza digital portátil, en el orden siguiente: 1) Cloruro de níquel, 2) Hipofosfito de sodio, 3) Citrato de sodio y 4) Cloruro de amonio.



Fig. 2.14. Balanza digital.

Para lograr que se disolvieran los reactivos con mayor rapidez y lograr homogeneidad se necesitó agitar la solución, para esto se utilizó el Hot Plate marca Fisher Scientific. Para finalizar se completó el litro de solución, se hizo lo mismo hasta tener la cantidad de solución deseada.



Fig. 2.15. Hot Plate con agitador magnético Fisher Scientific.

Para evitar tener grumos que se puedan llegar a formar a temperatura ambiente lo solución se filtra antes de almacenarla, así como también se filtran antes de verterla en la cámara de deposición.

### **2.7.3. PREPARACIÓN DE LOS DISCOS PARA DEPOSICIÓN**

El proceso de preparación de Los discos para realizar el recubrimiento consiste básicamente en desengrasado, secado, enmascarado, limpieza en ultrasonido y activación de la superficie a recubrir, este proceso se describe en la Fig. 2.16, este proceso está basado en la norma ASTM B 656 [31].

A continuación, se describe de forma general las diferentes actividades realizadas para la preparación de los discos, tal como se recomienda en alguna literatura [32].

Iniciando con el proceso, se realizó una limpieza inicial de los discos con jabón líquido y posterior enjuagado con agua destilada con el objetivo de retirar el aceite en la que se encontraban almacenadas para evitar la oxidación de las mismas, una vez retirada la película de aceite se secaron con aire caliente, finalizado el proceso de secado, la siguiente etapa es enmascarar con teflón el área que no se desea recubrir (perfil lateral del disco), esta etapa se efectúa para optimizar lo más posible la cantidad de solución.

Para continuar con el proceso se realizó una limpieza ultrasónica con acetona para esto se necesitó equipos especiales, en este caso de una cámara de baño ultrasónico marca BRANSON modelo M3800H (ver Fig. 2.17) en la cual se introdujeron los discos en acetona durante 10 min.

Luego de la limpieza ultrasónica, los discos se trasladaron en conjunto hasta una bandeja con soda cáustica a 60 °C (ver Fig. 2.18), para un decapado y limpieza intensa, para mantener la soda cáustica a esta temperatura se utiliza el uso de una cocina a gas de dos quemadores.

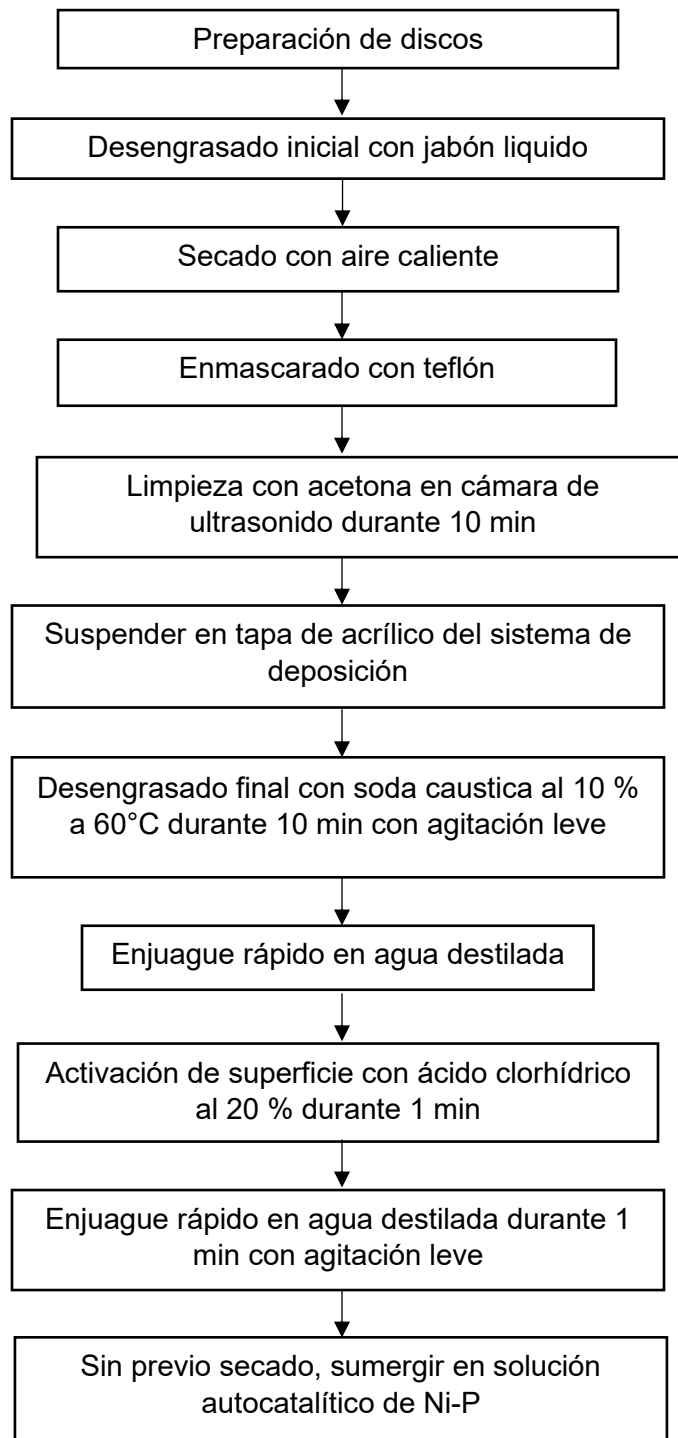


Fig. 2.16. Flujograma de proceso de preparación de discos para deposición de recubrimiento autocatalítico de Ni-P.



Fig. 2.17. Cámara de baño ultrasónico utilizada.



Fig. 2.18. Bandeja que contiene soda cáustica a 60 °C sobre cocina a gas de dos quemadores.

Luego de la etapa de limpieza con soda cáustica los discos se enjuagan con agua destilada en otra bandeja. La última etapa en el proceso de preparación de los discos, éstas se sumergieron en una bandeja con ácido clorhídrico al 20 % durante 1 min, para finalmente enjuagar las mismas en agua destilada en una bandeja distinta.

#### 2.7.4. PROCESO DE DEPOSICIÓN DEL RECUBRIMIENTO AUTOCATALÍTICO DE Ni-P

El proceso de deposición autocatalítico de Ni-P se realizó a una concentración de 60 ml/cm<sup>2</sup>. El calentamiento de la solución autocatalítica se realizó a una tasa lenta de 10 °C/h.

Cuando la solución alcanzo los 50 °C se empezó a agregar hidróxido de potasio (KOH) al 20 % esto con la finalidad de elevar el pH de la solución hasta el valor de 8.

Las probetas en conjunto se sumergen en la solución, la cual debe estar a 70 °C y a un pH de 8 a partir de ese momento se contabiliza el tiempo de deposición y solamente se queda censando y compensando el pH con solución de KOH concentrado al 10 % en volumen cada 10 min si es necesario para mantener el valor de 8 en la escala de pH.

Se efectuaron 3 lotes de 8 probetas, la solución en cada uno de las deposiciones es completamente nueva, es decir, nunca se ha utilizado.

El tiempo de deposición utilizado fue 120 min, finalizado el tiempo de deposición las probetas fueron removidas del sistema de deposición y fueron enjuagadas con agua para limpiar restos de solución y enfriarlas. En la Fig. 2.19. se presentan los discos recubiertos.



Fig. 2.19. Discos depositados

## 2.8. POST-TRATAMIENTOS TÉRMICOS

A todos los discos recubiertos se le realizó un tratamiento térmico posterior a la finalización del proceso de recubrimiento, a 200 °C durante 60 min en la cámara para tratamiento térmico con una atmósfera inerte de argón (ver Fig. 2.20), con la finalidad de aliviar el hidrógeno incubado en el recubrimiento durante la deposición.



Fig. 2.20. Configuración de la cámara de gas inerte.

Para esta etapa se calentó la cámara a la temperatura indicada monitoreando la temperatura interna con una termocupla integrada en la tapadera de la cámara, una vez alcanzada la temperatura se realizó el mismo procedimiento que el tratamiento térmico previo a la deposición, así se realizó el proceso en la cámara para sacar el oxígeno del interior, sellando la cámara, purgando con argón la atmosfera, se libera gas inerte al interior de la cámara manteniendo la salida de la misma abierta para posteriormente, cerrar la válvula de drenaje de la cámara para así conseguir únicamente argón confinado al interior.

De los discos tratados a 200 °C, la mitad de ellas se les realizó una segunda etapa de tratamiento térmico a 400 °C durante 60 min con la finalidad de producir cambios de fase en el depósito de Ni-P y obtener mejores características mecánicas como una mayor dureza. Al post-tratamiento térmico que consta solo del calentamiento a 200 °C se le denominó PPT-1 y al que consta del calentamiento a 400 °C además del de 200 °C se le denominó PPT-2. En la Fig. 2.21. se presenta el diagrama de los post-tratamientos térmicos realizados.

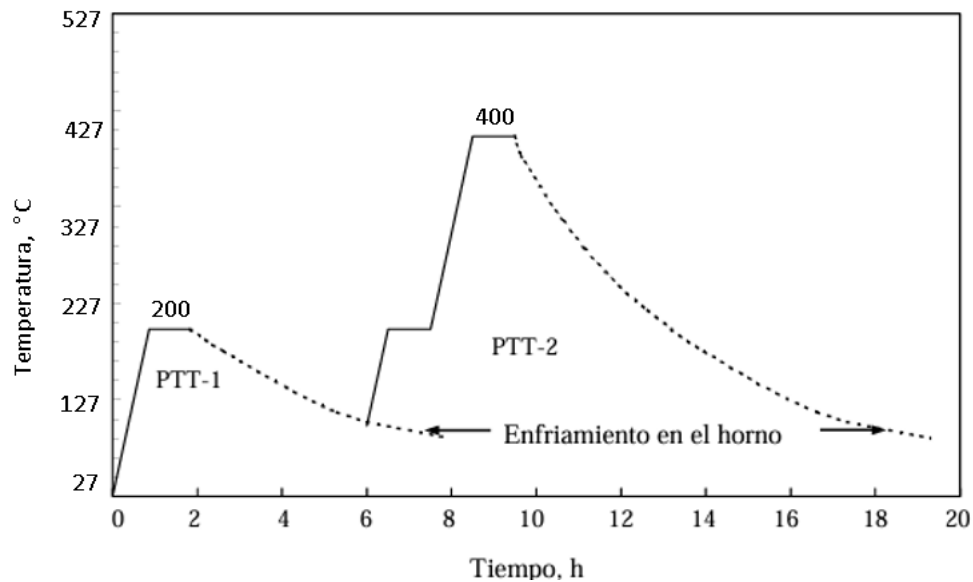


Fig. 2.21. Esquema de los post-tratamientos térmicos realizados a los conjuntos depósito-substrato.

## 2.9. MEDICIÓN DE ESPESORES

Para medir los espesores de los recubrimientos autocatalíticos de Ni-P, se utilizó un microscopio con retícula graduada. Esto requiere preparar muestras metalográficas de algunos de los discos recubiertos. Así en el primer paso, se realizó un corte en uno de los discos ensayados, tal como se presenta en la Fig. 2.22.



Fig. 2.22. Corte de la muestra metalográfica.

Luego de extraer la muestra mediante cortes, se llevó a cabo un embutido utilizando resina poliéster. Este proceso se realizó en frío y se dejó secar la resina durante 24 h, se deja un tiempo tan prolongado para asegurar que la resina se secó completamente.

Después de embutir la muestra, se procedió a pulir la superficie que se examinó. Primero, se realizó un desbaste con lijas de agua de los números 100, 200, 320, 400, 500 y 600. Luego, se utilizan lijas de los números 1,000, 1,200 y 1,500 para un pulido grueso. Finalmente, el pulido espejo se lleva a cabo en una máquina pulidora (ver Fig. 2.23), aplicando alúmina ( $Al_2O_3$ ) sobre un paño afelpado adhesivo colocado en el plato giratorio.



Fig. 2.23. Pulidora marca Presi.

Una vez pulida la superficie, se realiza un ataque químico para revelar las fases presentes. El reactivo de ataque químico utilizado fue nital al 2 %, compuesto por un 2 % de ácido nítrico diluido. Luego se midió el espesor del recubrimiento autocatalítico de Ni-P con ayuda de microscopio óptico marca Leitz modelo Metallovert con cámara digital incorporada marca Amscoupe modelo MU800 (ver Fig. 2.24), la superficie de Ni-P tiene una apariencia clara y lisa bien definida, diferenciable del sustrato claramente por el buen pulido del sustrato. Las imágenes se registraron mediante una cámara conectada a una computadora la cual tiene instalado el software Amscoupe.

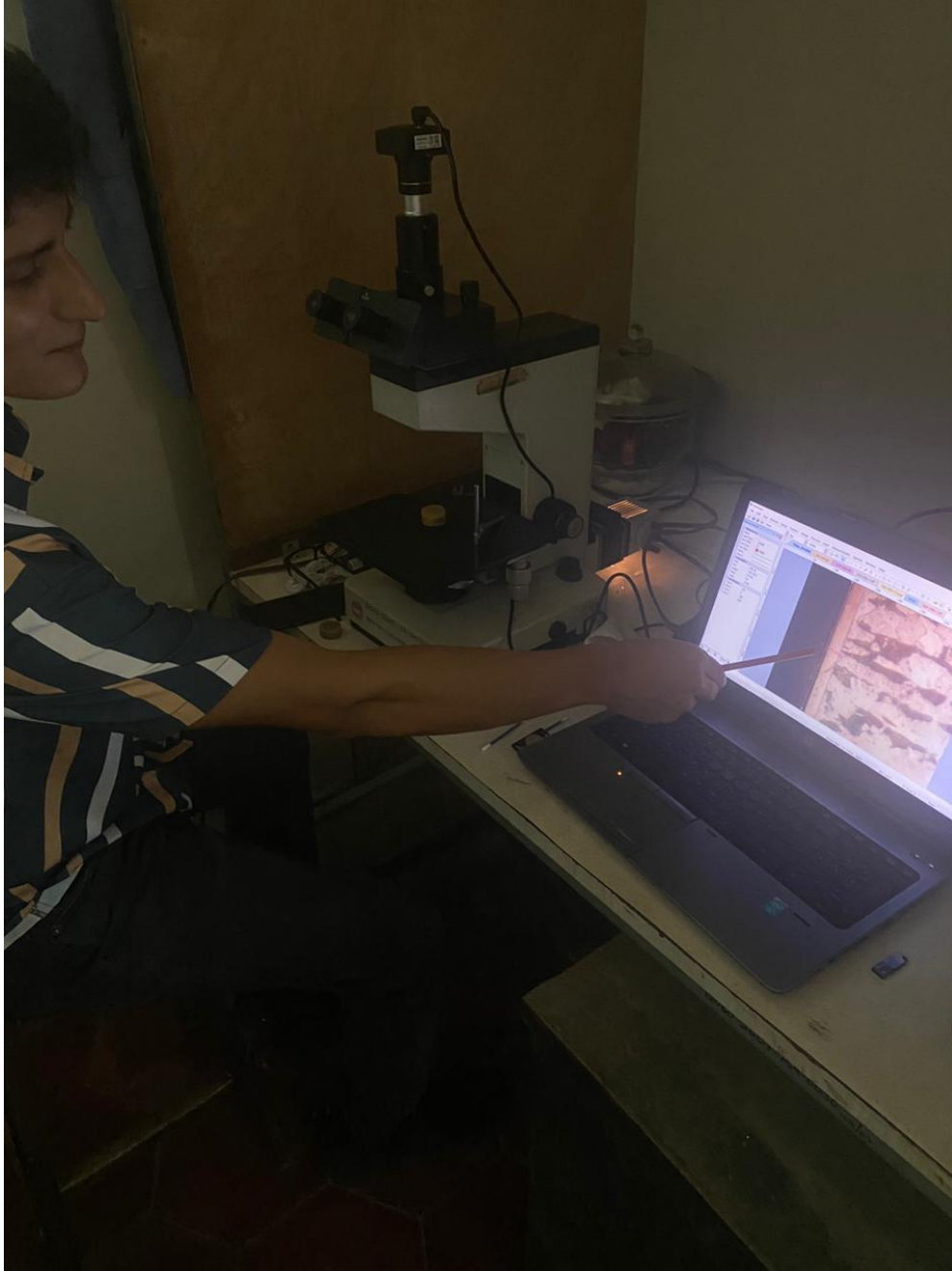


Fig. 2.24. Microscopio óptico con cámara digital incorporada para la medición del espesor.

## 2.10. DETERMINACIÓN DE LA DUREZA POR MICROINDENTACIÓN

Para determinar la dureza se utilizó el método de microindentación con penetrador Knoop, el cual es un método recomendado para recubrimientos, materiales delgados,

entre otros. En ocasiones este método es llamado prueba de microdureza aunque este término puede ser engañoso, ya que se puede interpretar que se determinarán pequeños valores de dureza cuando en realidad se refiere al uso de impresiones pequeños o cargas menores o iguales que 1 kg<sub>f</sub> [33].

La determinación de la dureza se llevó a cabo en un durómetro marca INNOVATEST ubicado en el Laboratorio de Matalografía de la Escuela de Ingeniería Mecánica de esta Universidad, el cual se presenta en la Fig. 2.25.



Fig. 2.25. Durómetro INNOVATEST, modelo VERZUS 750CCD.

Debido al tipo de durómetro la determinación de dureza se realiza automáticamente y se puede obtener un registro de la indentación mediante una cámara que está instalada.

La probeta antes de la prueba debe estar preparada, es decir la superficie de probeta debe estar plana y lo más paralela posible con la superficie de apoyo, con el fin de que la superficie de prueba esté paralela a la base del porta probeta, así se obtiene una mayor precisión de la medición.

Así, se coloca con cuidado la probeta en el porta probeta, los cuales se posiciona bajo el lente con un aumento de 10x para seleccionar la zona de prueba; luego se traslada bajo el indentador y se aproxima este último a la probeta sin hacer contacto con la probeta, tal como se presenta en la Fig. 2.26.

Luego se procede a verificar los parámetros de la prueba y se inicia la prueba, dándole Start a la pantalla táctil.

Una vez terminada la prueba de dureza se procede a desplazar la probeta bajo el lente y se procede a realizar la medición en la diagonal principal (ver Fig. 2.27). De este modo, el durómetro presenta automáticamente el valor de microdureza Knoop en la pantalla



Fig. 2.26. Posición del porta probeta durante la prueba de dureza.



Fig. 2.27. Posición del porta probeta bajo el lente.

## 2.11. PREPARACIÓN DE LOS DISCOS Y ESPIGAS

Antes de iniciar los ensayos de desgaste, los discos y las espigas se sometieron a un proceso previo de limpieza. Este procedimiento es crucial para garantizar la integridad de los discos y las espigas y la fiabilidad de los resultados obtenidos. La limpieza del espécimen es la primera etapa en esta preparación. El proceso de limpieza consiste en un lavado con agua y jabón líquido a modo de retirar los residuos del aceite en el que han estado guardada las espigas. Los discos recubiertos se guardaron después del post-tratamiento térmico por lo que su proceso de limpieza consiste en un cepillado. Esto es con el fin de llevar a cabo el ensayo de desgaste en seco, para lograr una mayor tasa de desgaste en la probeta que sea perceptible en tiempos accesibles.

Inmediatamente después de completar el proceso de limpieza específico para cada tipo de espécimen, se inició una fase crucial de preparación: el lijado manual de las superficies que entrarán en contacto durante la realización del ensayo. Esta etapa es fundamental para garantizar la uniformidad y la calidad de la interacción entre los componentes durante el experimento. Para las espigas, se sigue un procedimiento de lijado. Se comienza utilizando una hoja de papel de lija basta de carburo de silicio (SiC) con un número de grano 600. Esta primera etapa de lijado tiene como objetivo principal eliminar cualquier irregularidad superficial y garantizar una base uniforme para las etapas posteriores.

Una vez completada la fase inicial con la hoja de grano 600, se procede con hojas de papel de lija de menor grado de aspereza, como las de grano 800 y 1,000. Estas hojas menos bastas refinan aún más la superficie, eliminando cualquier marca o imperfección remanente de la etapa inicial de lijado. Finalmente, se lleva a cabo la etapa de acabado utilizando una hoja de papel de lija de grano 1,200, la más fina de todas. Esta etapa de lijado fino asegura una superficie extremadamente suave y uniforme en las espigas, lo que es crucial para garantizar una interacción precisa durante el ensayo.

Luego los discos y las espigas se secan utilizando aire caliente, para asegurar la remoción de la humedad y esta no perjudique los resultados del experimento.

## 2.12. ENSAYO DE DESGASTE TIPO ESPIGA SOBRE DISCO

En el ámbito de la ciencia de materiales, la comprensión del desgaste de los materiales es fundamental para el diseño y la optimización de componentes mecánicos en una amplia gama de aplicaciones industriales. Uno de los métodos más utilizados para estudiar el desgaste es el ensayo de desgaste tipo espiga sobre disco, una técnica de prueba que simula las condiciones de deslizamiento y fricción entre dos superficies en contacto.

Este ensayo proporciona información crucial sobre la resistencia al desgaste, la lubricación efectiva y la durabilidad de materiales como metales, polímeros y cerámicos. En este ensayo, una espiga de prueba se posiciona sobre un disco que gira, mientras se aplica una carga específica. Durante los ensayos, se registran la fuerza de fricción y el tiempo de dicho ensayo.

Los ensayos fueron realizados con el módulo para ensayos marca GUNT, modelo TM 260.3, el cual se ha integrado como un complemento esencial al módulo básico para estudios tribológicos de la misma marca, modelo TM 260 (ver Fig. 2.28).

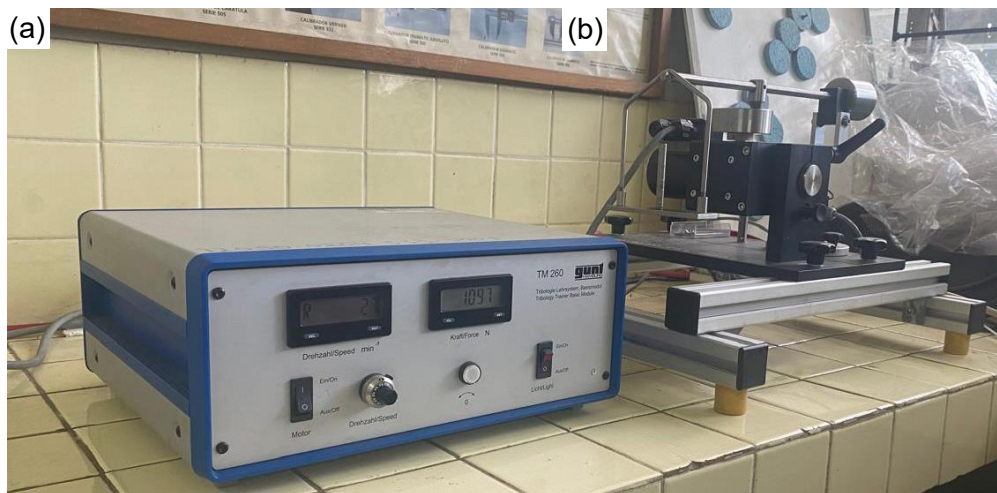


Fig. 2.28. Módulos para estudios tribológicos marca GUNT: a) Módulo básico modelo TM 260.3; y b) módulo de control modelo TM 260.

Este equipo está ubicado en el laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica, este equipo permite llevar a cabo investigaciones detalladas sobre el comportamiento de materiales en condiciones de fricción y deslizamiento.

Los resultados del ensayo de desgaste tipo espiga sobre disco se reportan de manera individual, registrando la pérdida de masa tanto para la espiga como para el disco.

Este método de evaluación se lleva a cabo mediante la medición precisa de la masa de los discos y las espigas antes y después del ensayo, utilizando una balanza analítica de alta precisión (ver Fig. 2.29).



Fig. 2.29. Balanza analítica.

Los ensayos de desgaste se realizaron para cuatro (4) distancias de deslizamiento (500, 1,000, 1,500 y 2,000 m) bajo las mismas condiciones de carga, velocidad, sin fluido lubricante ni corrosivo y distintas condiciones del material, post-tratamiento térmico a 200 °C (PPT-1) y a 400 °C (PPT-2). Además, para cada distancia de deslizamiento se realizarán cinco (5) ensayos con el fin de reportar el promedio correspondiente y su desviación estándar (ver Tabla 2.3).

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

Condición de material	Variables		
	Velocidad, m/s	Distancia de deslizamiento, m	Carga, N
Discos de acero SAE 1020 con recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PPT-1	0.05	500	5
		1,000	
		1,500	
		2,000	
Discos de acero SAE 1020 con recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PPT-2	0.05	500	
		1,000	
		1,500	
		2,000	

La velocidad de todos los ensayos se estableció de 0.05 m/s, una velocidad recomendada para los ensayos tipo espiga sobre disco [34]. El módulo utilizado para llevar a cabo estos ensayos ofrece la posibilidad de ajustar el número de revoluciones de salida mediante un potenciómetro, con un intervalo que va desde 0 hasta 200 rpm. Por lo tanto, se convirtió la velocidad lineal en velocidad angular para determinar el número de revoluciones con el que se realizaron los ensayos. Para realizar esta conversión se utilizó la Ec. 2.1, la cual se expresa como:

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

donde:  $\omega$  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 proceso para determinar el diámetro de la trayectoria de deslizamiento implicó realizar mediciones precisas en el disco de prueba ensayado en el módulo de ensayos tipo espiga sobre disco. En este contexto, se llevaron a cabo dos mediciones en el disco: una en el diámetro interno de la huella y otra en el diámetro externo las cuales son 3.71 y 4.87 cm, respectivamente. Para calcular el diámetro central de la huella de desgaste, se calculó el promedio de estos valores, resultando en un diámetro medio de 3.79 cm.

Posteriormente, utilizando este valor en el centro de la huella, se sustituyó en la Ec. 2.1 para obtener un valor de 2.64 rad/s. Este resultado, una vez convertido a

revoluciones por minuto, representa una velocidad angular de 25.19 rpm, debido a que el equipo trabaja con intervalos de 1 rpm se aproximara a 26 rpm.

Para superar la limitación del módulo para ensayos tipo espiga sobre disco, que no permite determinar la distancia de deslizamiento directamente, durante la realización de los experimentos se implementó un método alternativo: registrar los tiempos en lugar de las distancias. Este enfoque permite medir de manera precisa la duración de cada prueba y calcular la distancia equivalente posteriormente. El proceso para obtener el tiempo equivalente a una determinada distancia es simple, aunque efectivo: se divide la distancia de deslizamiento entre la velocidad lineal. Esta operación proporciona el tiempo necesario para que la espiga recorra la distancia especificada a la velocidad establecida. Este enfoque permite realizar comparaciones precisas entre diferentes condiciones de ensayo y evaluar el desempeño de los materiales bajo diferentes velocidades y cargas

Ec. 2.2.

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

donde:  $t$  es el tiempo en segundos,

$s$  la distancia de deslizamiento en metros, y

$v$  velocidad lineal de deslizamiento.

En la Tabla 2.4 se presenta los tiempos para cada distancia de deslizamiento, debido a que la velocidad de deslizamiento es la misma para todos los experimentos.

Tabla 2.4. Tiempos requeridos para las distancias de deslizamientos establecidas.

Distancia de deslizamiento, m	Velocidad de deslizamiento, m/s	Tiempo requerido, h
500	0.05	2.68
1,000		5.38
1,500		8.06
2,000		10.76

Después de establecer meticulosamente las variables de tiempo y cargas, se procede a llevar a cabo los ensayos. Una vez que se ha encendido la caja de mando y el

motor, se ubican tanto el disco como la espiga en sus respectivos soportes y se baja cuidadosamente el brazo de carga hasta que la espiga haga contacto con el disco.

A continuación, se selecciona la combinación de pesas correspondiente a la carga requerida para el experimento, según se detalla en la Tabla 2.1, y se coloca en el portacargas. Una vez asegurada la carga, se fija el portacarga al brazo de carga. Con todos los elementos en su lugar, se ajusta con precisión el número de revoluciones en la caja de mando y se registra el valor de la fuerza de fricción. Este proceso permite garantizar que cada ensayo se realice bajo condiciones controladas y reproducibles, proporcionando así datos confiables para su análisis posterior. La fuerza de fricción es medida con el fin de obtener una curva del coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento de cada uno de los ensayos. Para determinar el coeficiente de fricción se usa la Ec. 2.3.

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

donde:  $\mu$  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.

### **3 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En este capítulo, se exponen los resultados obtenidos a través de la implementación de las técnicas experimentales detalladas en el capítulo 2. Estos resultados han sido ordenados sistemáticamente y sometidos a un análisis. La presentación de los datos se efectúa utilizando tablas y figuras, las cuales ilustran los valores de los resultados de los ensayos tipo espiga sobre disco, con los parámetros previamente establecidos.

Las tablas y figuras proporcionan una representación visual de los resultados, permitiendo una comprensión detallada de las variaciones observadas en función de los diferentes parámetros. Además, se ha llevado a cabo un análisis estadístico de los datos obtenidos, con el fin de identificar patrones y tendencias significativas.

#### **3.1. RESULTADOS DE LAS MEDICIONES DE LOS ESPESORES DE LOS RECUBRIMIENTOS AUTOCATALÍTICOS DE Ni-P**

Las mediciones de los espesores de los recubrimientos autocatalíticos de Ni-P se realizaron en tres discos de cada uno de las tres deposiciones realizadas. Así la ubicación de los discos durante la deposición autocatalítica se presenta en la Fig. 3.1, en la cual se puede estudiar la intensidad de la agitación del baño en donde la posición 3 representa la distancia más alejada de la salida de la bomba de recirculación de la solución. En las Figs. 3.2 - 3.4. se presentan las micrográficas de los recubrimientos obtenidos en para cada una de las deposiciones y la ubicación de cada muestra con el fin de determinar el espesor promedio del recubrimiento.

En la Tabla 3.1 se presenta los valores de espesor del recubrimiento correspondientes a los discos presentados en las Figs. 3.2 - 3.4. en dicha tabla se presenta el valor de los espesores de cada uno para posteriormente calcular el valor promedio y obtener la desviación estándar de cada lote.

El espesor promedio de los recubrimientos de los tres (3) lotes es de 12.41  $\mu\text{m}$ , con una desviación estándar de 0.63  $\mu\text{m}$ .

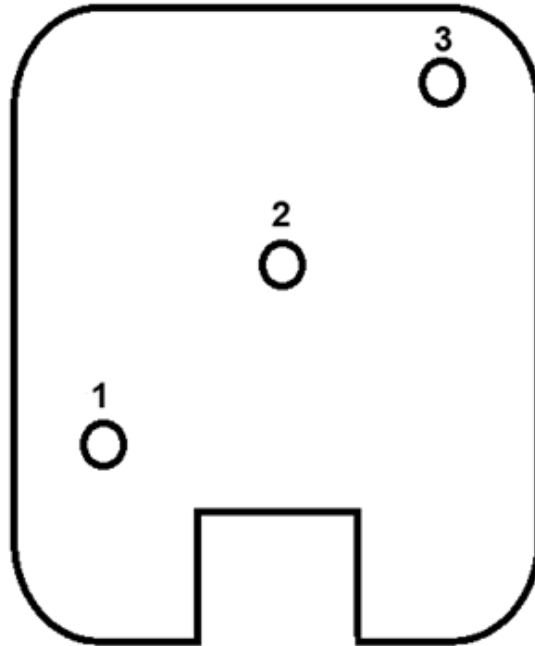


Fig. 3.1. Ubicación de los discos utilizados para medir los espesores de cada lote de probetas recubiertas con depósito autocatalítico de Ni-P.

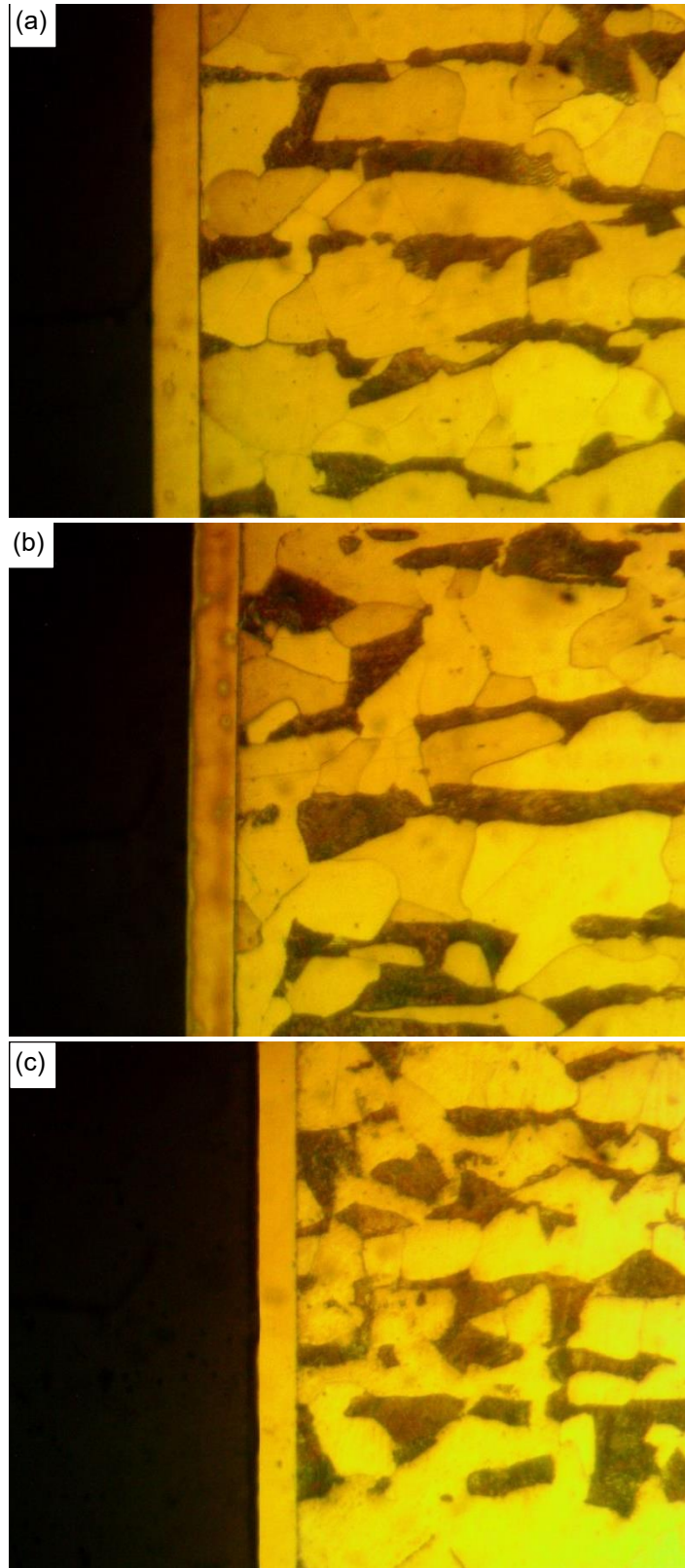


Fig. 3.2. Micrografía proveniente del lote 1 en: a) Posición 1; b) posición 2; y c) posición 3.

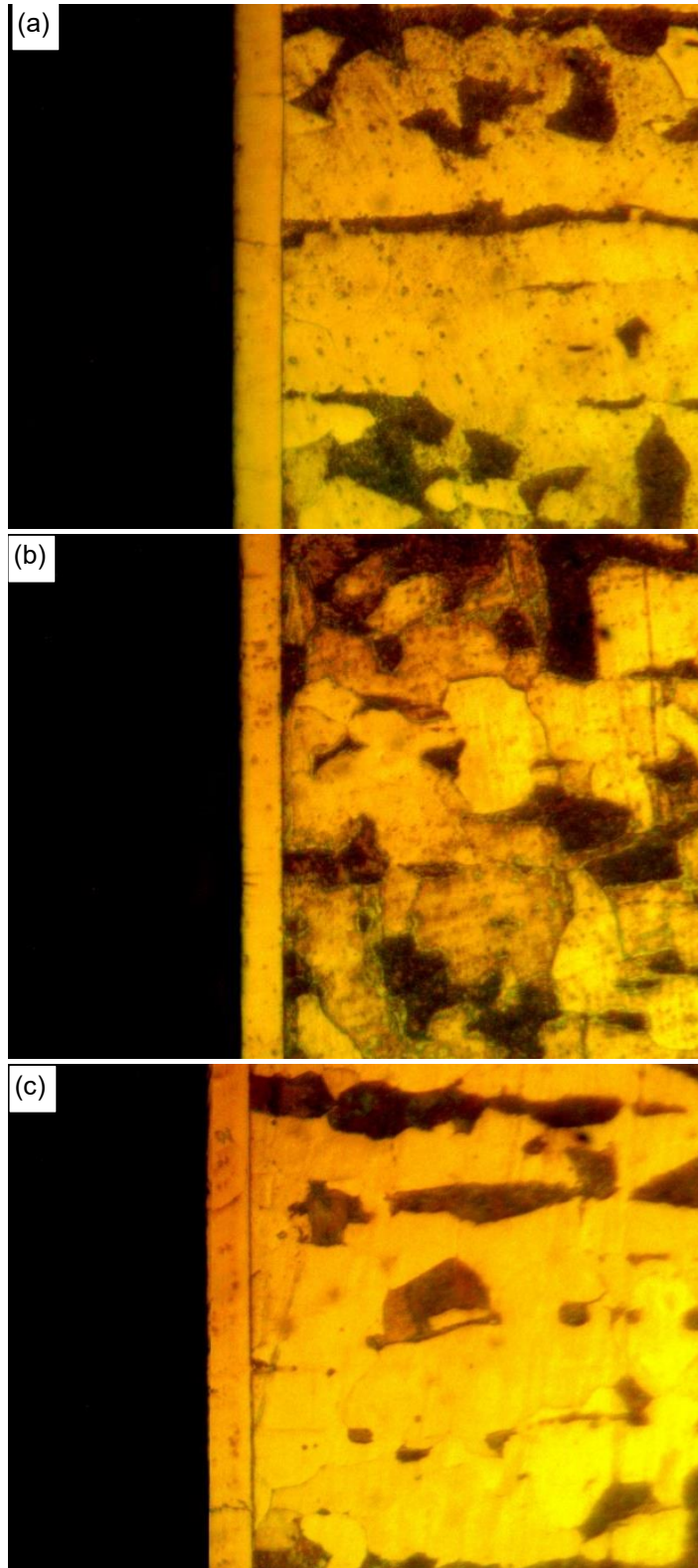


Fig. 3.3. Micrografía proveniente del lote 2 en: a) Posición 1; b) posición 2; y c) posición 3.

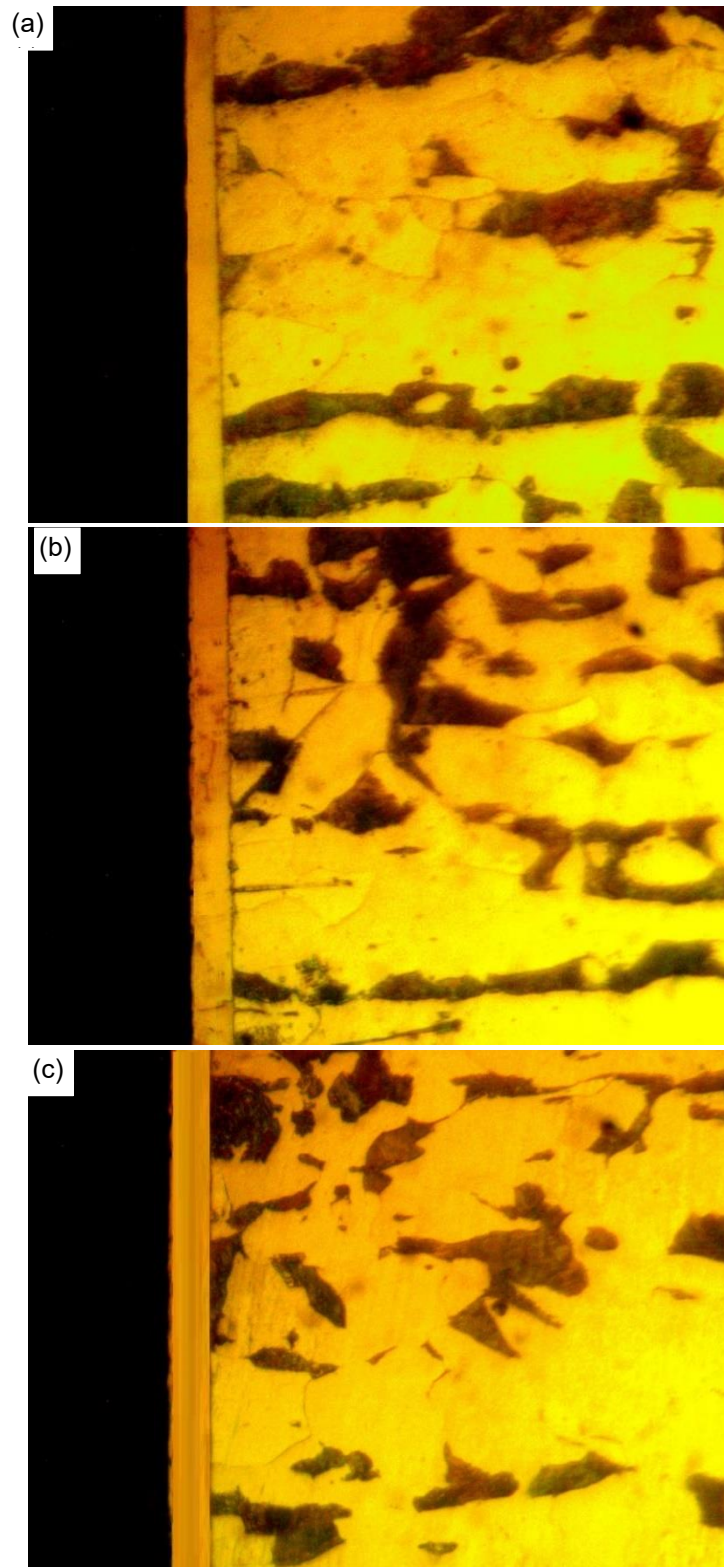


Fig. 3.4. Micrografía proveniente del lote 3 en: a) Posición 1; b) posición 2; y c) posición 3.

Tabla 3.1. Resultados de las mediciones de los espesores de los recubrimientos para todos los lotes de los discos recubiertos y valores promedios y desviaciones estándar de los espesores.

Lote	Medida	Espesor, $\mu\text{m}$	Espesor promedio del lote, $\mu\text{m}$	Desviación estándar, $\mu\text{m}$	Espesor promedio, $\mu\text{m}$
1	1	13.78	13.01	1.66	12.41
	2	14.15			
	3	11.10			
2	1	13.90	12.48	1.24	
	2	11.95			
	3	11.59			
3	1	11.49	11.76	0.38	
	2	12.20			
	3	11.59			

### 3.2. DETERMINACIÓN DE LA DUREZA

Para la determinación de la dureza de los discos con recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PPT-1 y PPT-2, se eligieron un disco para cada condición de PTT. Así, se tomaron 5 mediciones en las superficies de cada disco dejando una distancia considerable entre cada indentación, esto para evitar la interferencia de las zonas endurecidas por dichas indentaciones en la superficie de cada disco.

En las Tablas 3.2 y 3.3 se presentan los resultados de las mediciones para cada condición de material. En las Figs. 3.5 - 3.6 se presentan las mediciones para la probeta con PPT-1 y La probeta con PPT-2, respectivamente.

Tabla 3.2. Valores de microdureza Knoop sobre discos de acero SAE 1020 con recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PPT-1.

N°	Diagonal mayor, mm	Valor de HK	Promedio de HK	DE de HK
1	0.2050	337.99	254.87	46.71
2	0.2483	230.39		
3	0.2453	235.90		
4	0.2428	240.97		
5	0.2490	229.09		

Tabla 3.3. Valores de microdureza Knoop sobre discos de acero SAE 1020 con recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PPT-2.

N°	Diagonal mayor, mm	Valor de HK	Promedio de HK	DE de HK
1	0.1879	402.24	397.49	7.17
2	0.1884	400.03		
3	0.1879	402.23		
4	0.1920	385.08		
5	0.1889	397.85		

Se obtuvo un valor promedio de HK 254.87 y una desviación estándar de 46.71, para un acero SAE 1020 con recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PTT-1 de alivio de hidrógeno.

Además, se obtuvo un valor promedio de HK de 397.49 y una desviación estándar de 7.17 para un acero SAE con recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PTT-2 de endurecimiento. Así, estos resultados están en los mismos intervalos obtenidos en otras investigaciones reportadas en la literatura [35 y 36].

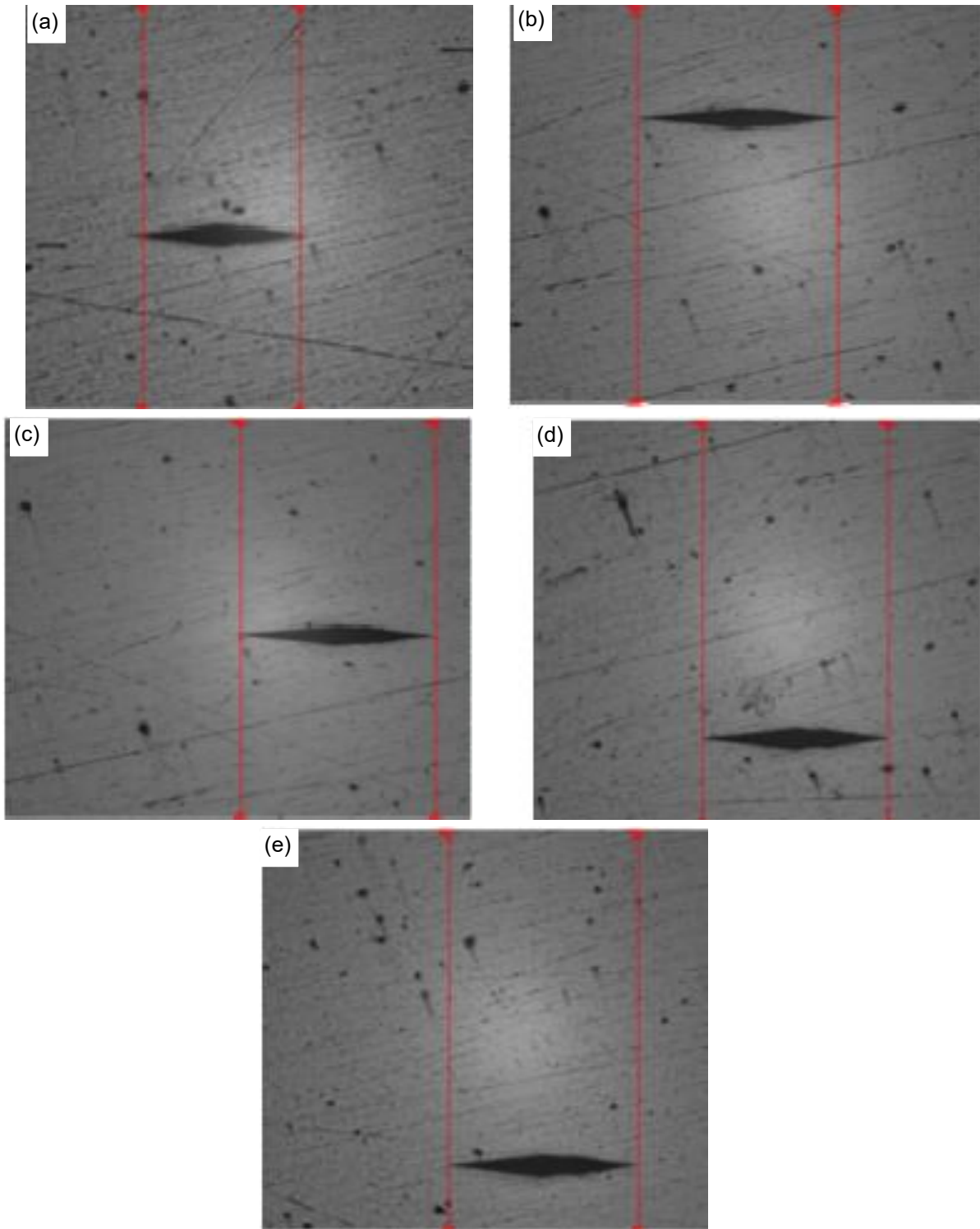


Fig. 3.5. Indentaciones de microdureza Knoop en discos de acero SAE 1020 con recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PTT-1, utilizando una carga de 1 kg en durómetro INNOVATEST, modelo VERZUS 750CCD: a) Lectura 1; b) lectura 2; c) lectura 3; d) lectura 4; y e) lectura 5.

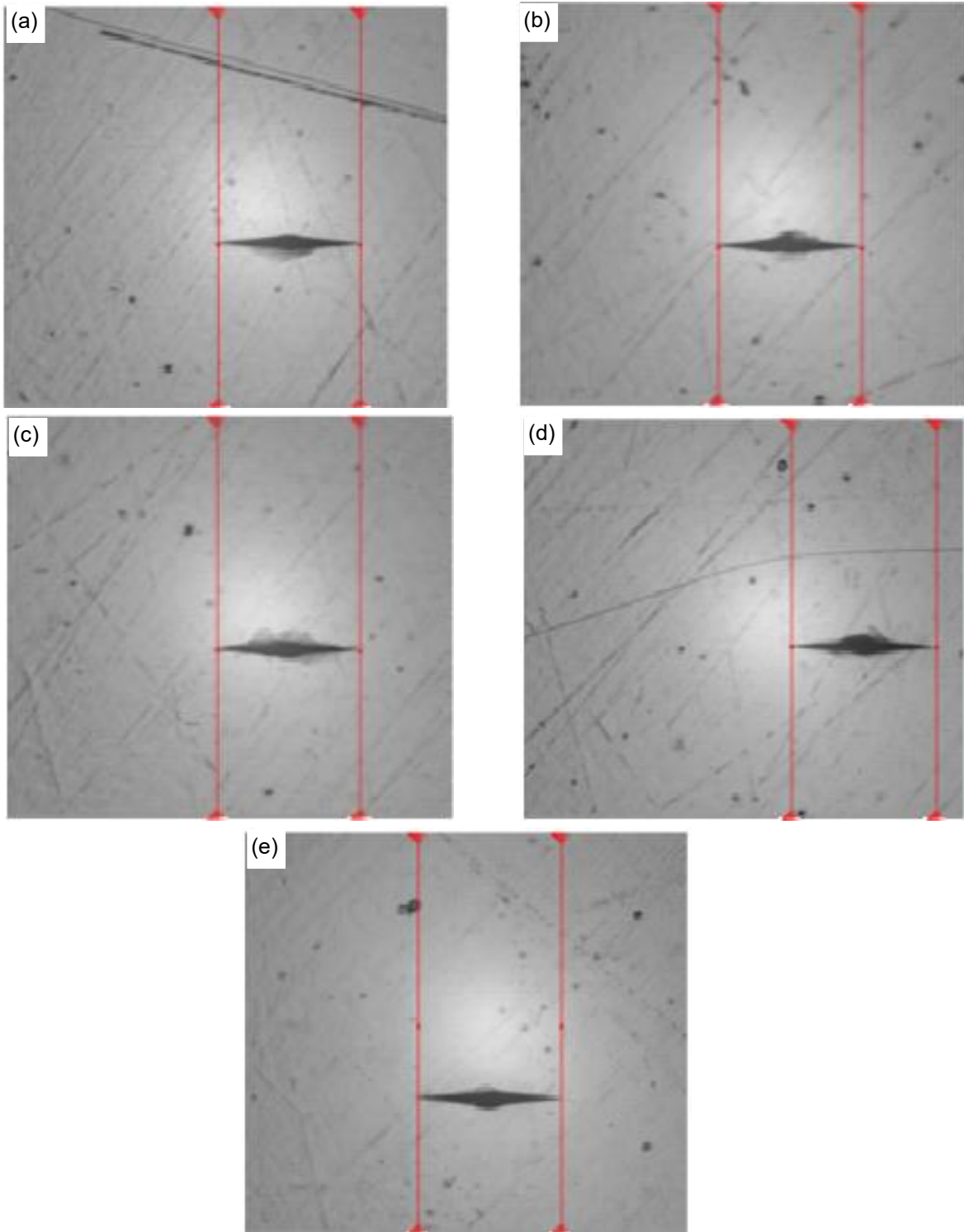


Fig. 3.6. Indentaciones de microdureza Knoop en discos de acero SAE 1020 con recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PTT-2, utilizando una carga de 1 kg en durómetro INNOVATEST, modelo VERZUS 750CCD: a) Lectura 1; b) lectura 2; c) lectura 3; d) lectura 4; y e) lectura 5.

### **3.3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DESGASTE**

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco, dichos resultados comprenden las pérdidas de masa tanto de los discos de acero SAE 1020 con recubrimientos autocatalíticos de Ni-P con PTT-1 y PTT-2, como también de las espigas de acero SAE O1. También, se presentan las curvas de coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento para cada una de las condiciones ensayadas con espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas sobre discos de acero SAE 1020 con recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PTT-1 y PTT-2.

En las Tabla 3.4 y 3.5 se presentan los valores de masa antes y después de cada uno de los discos ensayados con el PTT-1 y el PPT-2, así como la pérdida de masa de cada uno de ellos.

De la misma manera en la Tabla 3.6 y 3.7 se presentan los mismos parámetros para las espigas. En las Figs. 3.7 - 3.14 se presenta el comportamiento del coeficiente de fricción de cada uno de los ensayos en función de la distancia de deslizamiento. Los resultados se obtuvieron midiendo la fuerza de fricción durante los ensayos, y luego se obtuvieron los coeficientes de fricción utilizando la Ec. 2.3.

Tabla 3.4. Valores de desgaste de los discos con recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PPT-1 utilizando una carga de 5 N y espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas.

N°	Distancia de deslizamiento, m	Masa inicial, g	Masa final, g	Pérdida, g	Promedio	DE X10 <sup>-4</sup>	Coef. de variación
1	500	148.4983	148.4974	0.0009	0.00124	4.21900	0.34024
2		150.7475	150.7468	0.0007			
3		148.4937	148.4923	0.0014			
4		150.7466	150.7451	0.0015			
5		150.0174	150.0157	0.0017			
6	1,000	148.7456	148.7398	0.0058	0.00452	9.36483	0.20719
7		149.4140	149.4099	0.0041			
8		150.0215	150.0179	0.0036			
9		133.7643	133.7591	0.0052			
10		148.7228	148.7189	0.0039			
11	1,500	148.4983	148.4914	0.0069	0.00538	12.47798	0.23193
12		149.4754	149.4697	0.0057			
13		147.3153	147.3092	0.0061			
14		149.6234	149.6194	0.0040			
15		149.1293	149.1251	0.0042			
16	2,000	148.8397	148.8328	0.0069	0.00654	4.33590	0.06630
17		149.6797	149.6731	0.0066			
18		149.3505	149.3435	0.0070			
19		149.8415	149.8353	0.0062			
20		149.6313	149.6253	0.0060			

Tabla 3.5. Valores de desgaste de los discos con recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PPT-2 utilizando una carga de 5 N y espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas.

N°	Distancia de deslizamiento, m	Masa inicial, g	Masa final, g	Pérdida, g	Promedio	DE X10 <sup>-4</sup>	Coef. de variación
1	500	151.7214	151.7205	0.0009	0.00082	1.30384	0.15900
2		150.9992	150.9984	0.0008			
3		151.7219	151.7212	0.0007			
4		154.6087	154.6080	0.0007			
5		147.2572	147.2562	0.001			
6	1,000	151.0006	150.9993	0.0013	0.00156	2.40832	0.15438
7		154.6126	154.6111	0.0015			
8		149.6792	149.6778	0.0014			
9		149.6790	149.6771	0.0019			
10		147.2752	147.2735	0.0017			
11	1,500	145.1019	145.0992	0.0027	0.00230	2.64575	0.11503
12		151.4315	151.4293	0.0022			
13		149.7610	149.7590	0.002			
14		149.6397	149.6373	0.0024			
15		146.2948	146.2926	0.0022			
16	2,000	151.4320	151.4291	0.0029	0.00274	1.51658	0.05535
17		149.7621	149.7596	0.0025			
18		149.6330	149.6302	0.0028			
19		145.9091	145.9063	0.0028			
20		145.9072	145.9045	0.0027			

Tabla 3.6. Valores de desgaste de espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas, aplicando una carga de 5 N sobre discos de acero SAE 1020 con recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PPT-1.

Nº	Distancia de deslizamiento, m	Masa inicial, g	Masa final, g	Pérdida, g	Promedio	DE X10 <sup>-4</sup>	Coef. de variación
1	500	2.3219	2.3218	0.0001	0.00014	5.47723	0.39123
2		2.3457	2.3456	0.0001			
3		2.2154	2.2153	0.0001			
4		2.3258	2.3256	0.0002			
5		2.2994	2.2992	0.0002			
6	1,000	2.2123	2.2120	0.0003	0.00028	8.36660	0.29881
7		2.3079	2.3077	0.0002			
8		2.3480	2.3477	0.0003			
9		2.2215	2.2213	0.0002			
10		2.1505	2.1501	0.0004			
11	1,500	2.3219	2.3216	0.0003	0.00034	5.47723	0.16109
12		2.3082	2.3078	0.0004			
13		2.3019	2.3016	0.0003			
14		2.2905	2.2901	0.0004			
15		2.2839	2.2836	0.0003			
16	2,000	2.2666	2.2661	0.0005	0.00046	5.47723	0.11907
17		2.2589	2.2584	0.0005			
18		2.3365	2.3361	0.0004			
19		2.1476	2.1471	0.0005			
20		2.1575	2.1571	0.0004			

Tabla 3.7. Valores de desgaste de espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas, aplicando una carga de 5 N sobre discos de acero SAE 1020 con recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PPT-2.

Nº	Distancia de deslizamiento, m	Masa inicial, g	Masa final, g	Pérdida, g	Promedio	DE X10 <sup>-4</sup>	Coef. de variación
1	500	2.1963	2.1962	0.0001	0.0002	5.4772	0.3423
2		2.3291	2.3289	0.0002			
3		2.2737	2.2735	0.0002			
4		2.2678	2.2676	0.0002			
5		2.3147	2.3146	0.0001			
6	1,000	2.2950	2.2948	0.0002	0.0002	5.4772	0.2282
7		2.1738	2.1736	0.0002			
8		2.2973	2.2970	0.0003			
9		2.1253	2.1250	0.0003			
10		2.2613	2.2611	0.0002			
11	1,500	2.3095	2.3092	0.0003	0.0003	5.4772	0.1611
12		2.3350	2.3347	0.0003			
13		2.1978	2.1974	0.0004			
14		2.2682	2.2678	0.0004			
15		2.2494	2.2491	0.0003			
16	2,000	2.3091	2.3088	0.0003	0.0004	7.0711	0.1768
17		2.2696	2.2692	0.0004			
18		2.2880	2.2875	0.0005			
19		2.2384	2.2380	0.0004			
20		2.3254	2.3250	0.0004			

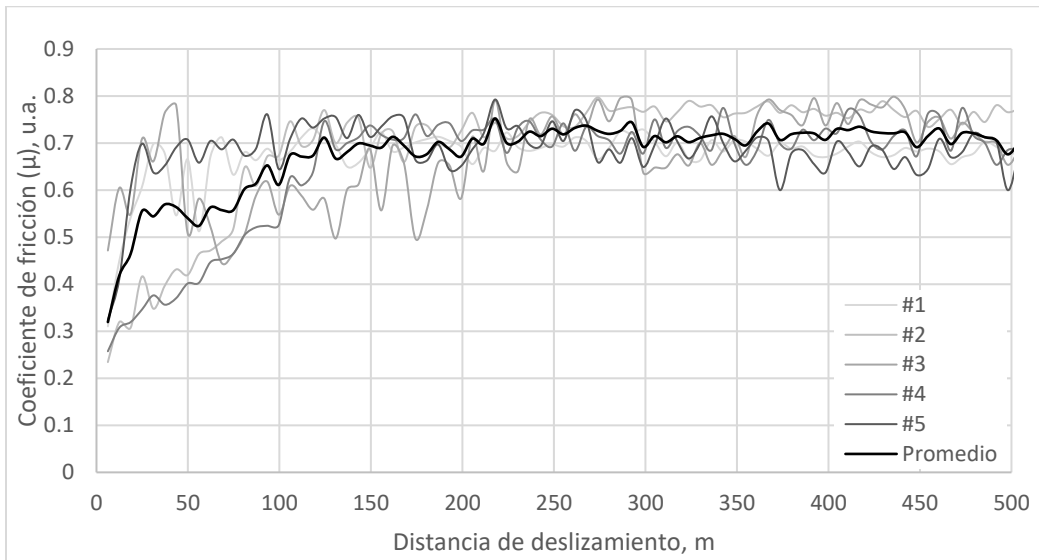


Fig. 3.7. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos con PPT-1 y una espiga de acero SAE O1, con carga de 5 N y distancia de deslizamiento de 500 m.

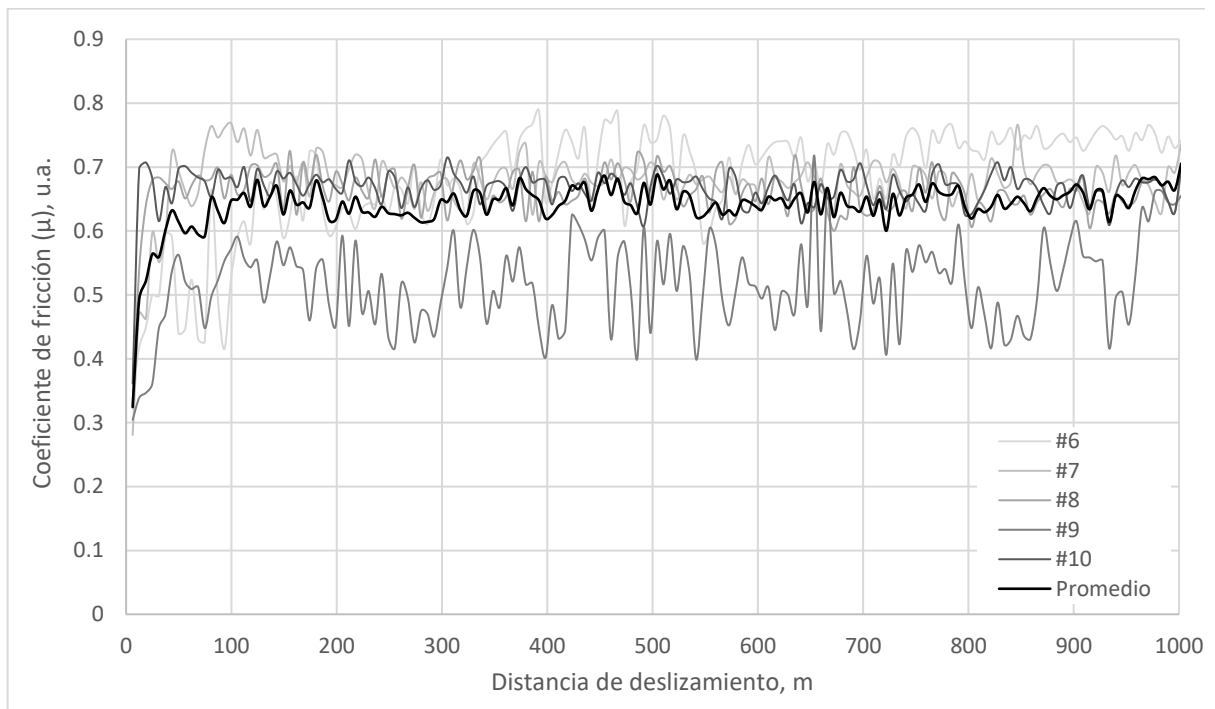


Fig. 3.8. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos con PPT-1 y una espiga de acero SAE O1, con carga de 5 N y distancia de deslizamiento de 1,000 m.

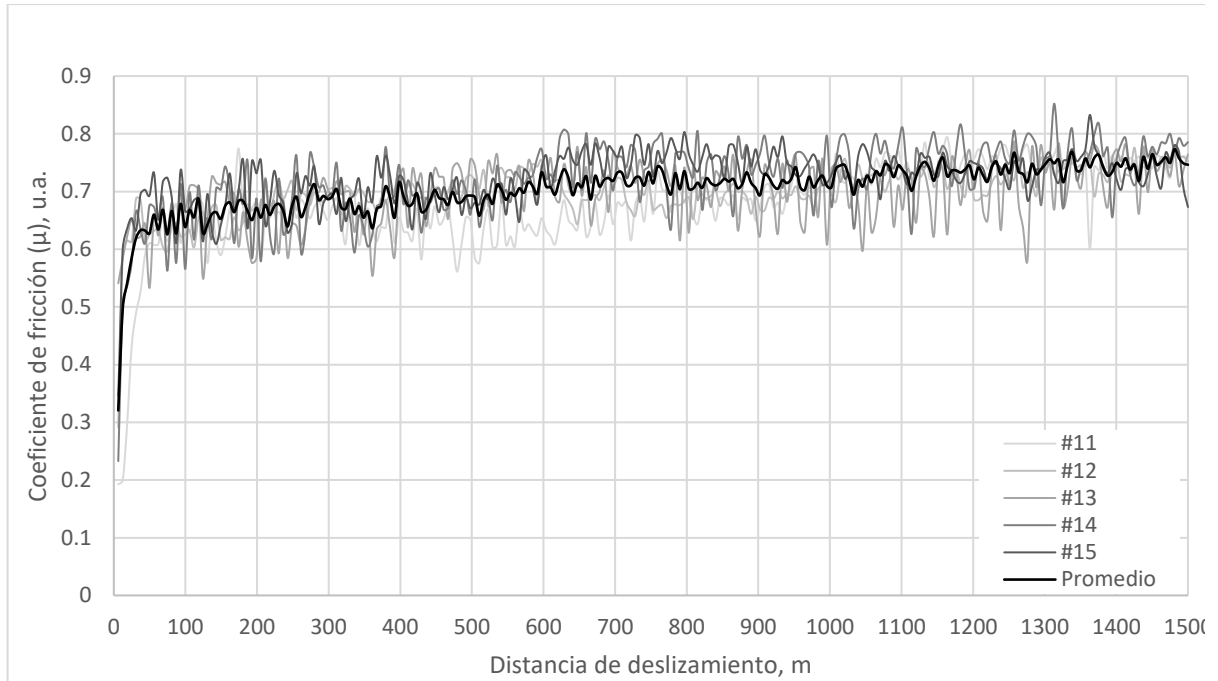


Fig. 3.9. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos con PPT-1 y una espiga de acero SAE O1, con carga de 5 N y distancia de deslizamiento de 1,500 m.

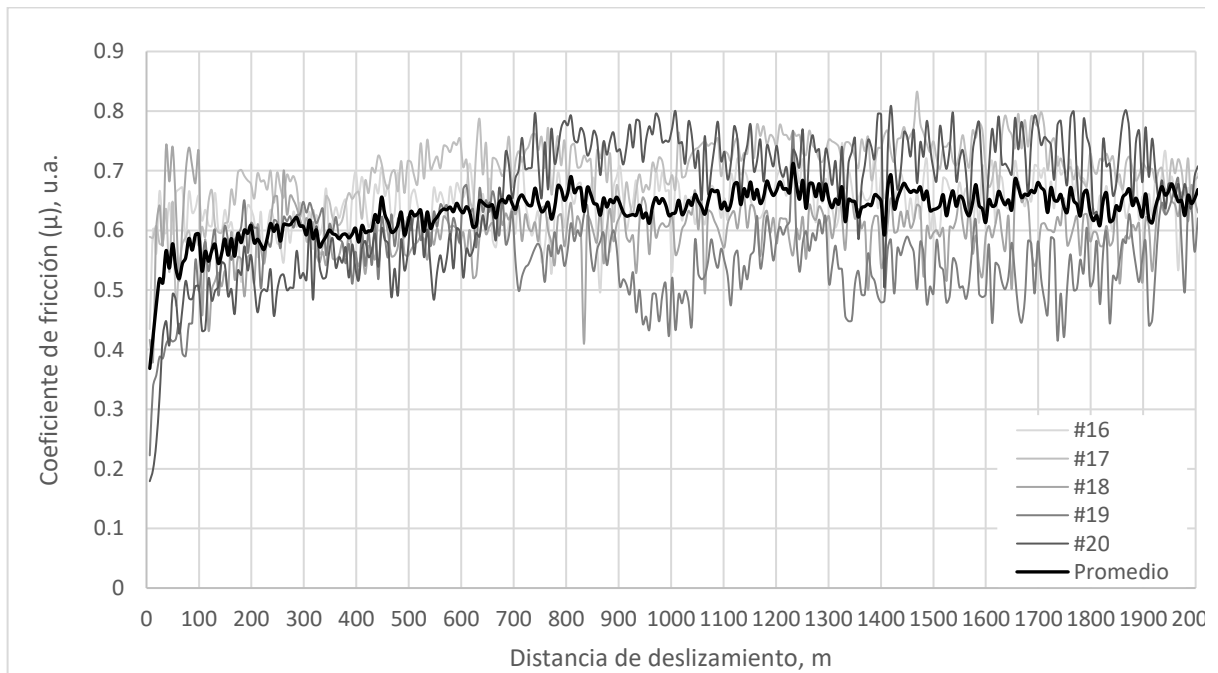


Fig. 3.10. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos con PPT-1 y una espiga de acero SAE O1, con carga de 5 N y distancia de deslizamiento de 2,000 m.

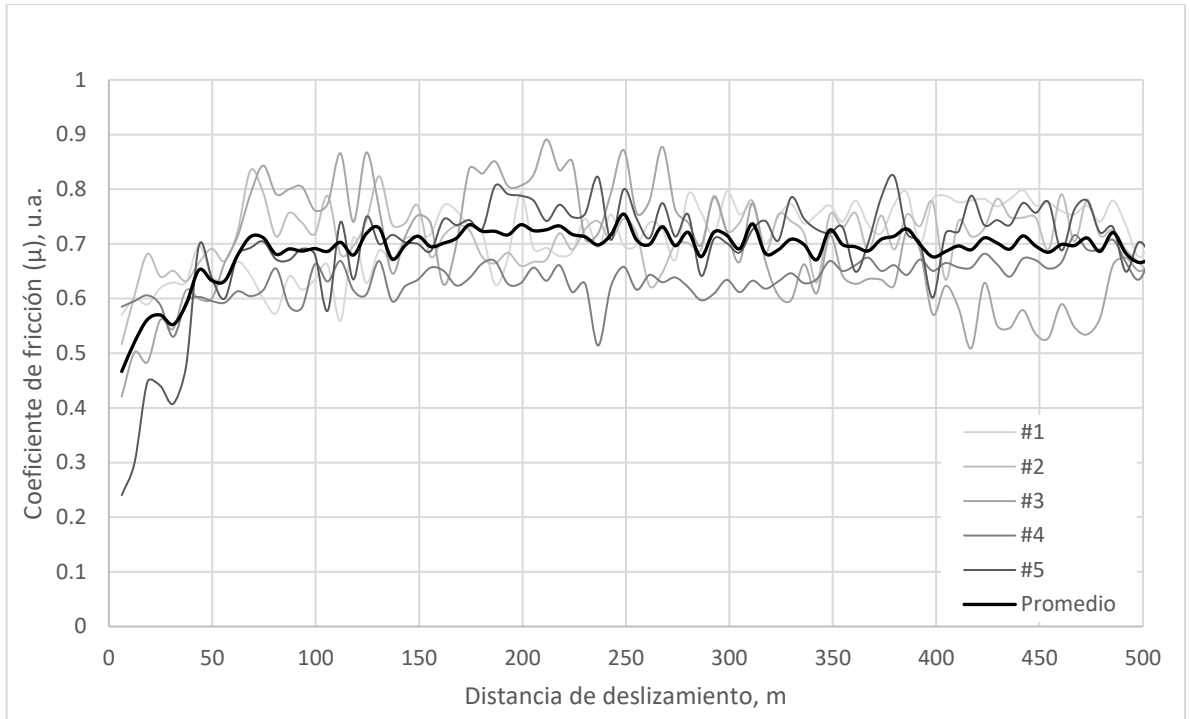


Fig. 3.11. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos con PPT-2 y una espiga de acero SAE O1, con carga de 5 N y distancia de deslizamiento de 500 m.

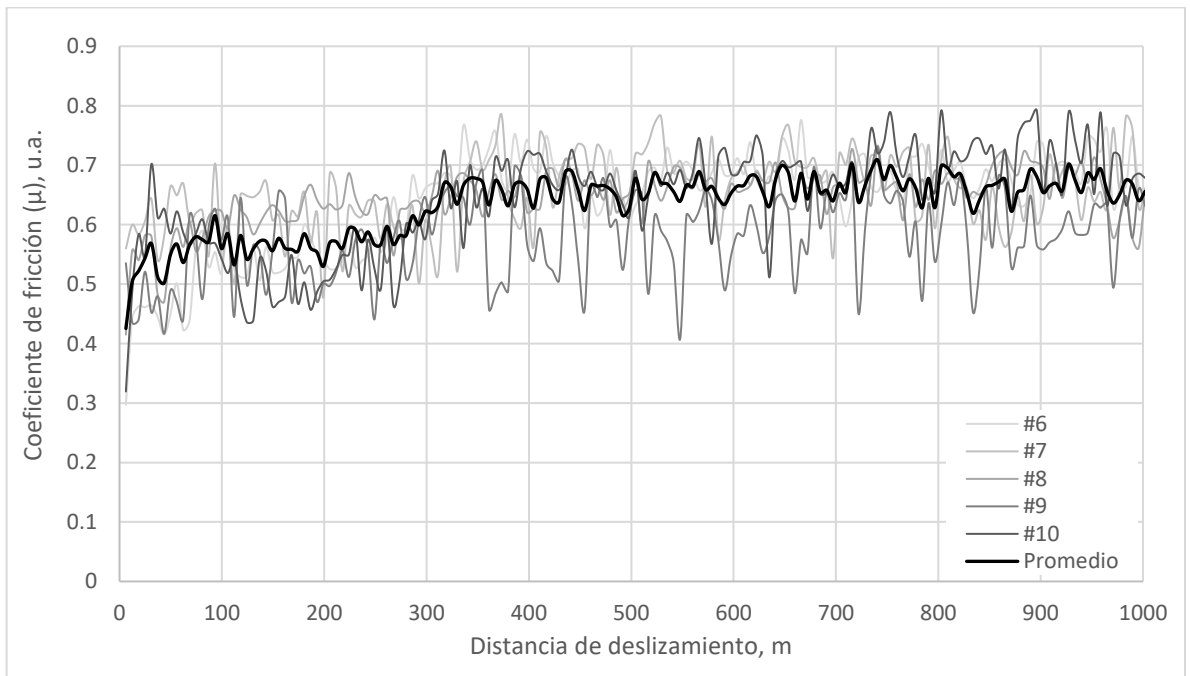


Fig. 3.12. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos con PPT-1 y una espiga de acero SAE O1, con carga de 5 N y distancia de deslizamiento de 1,000 m.

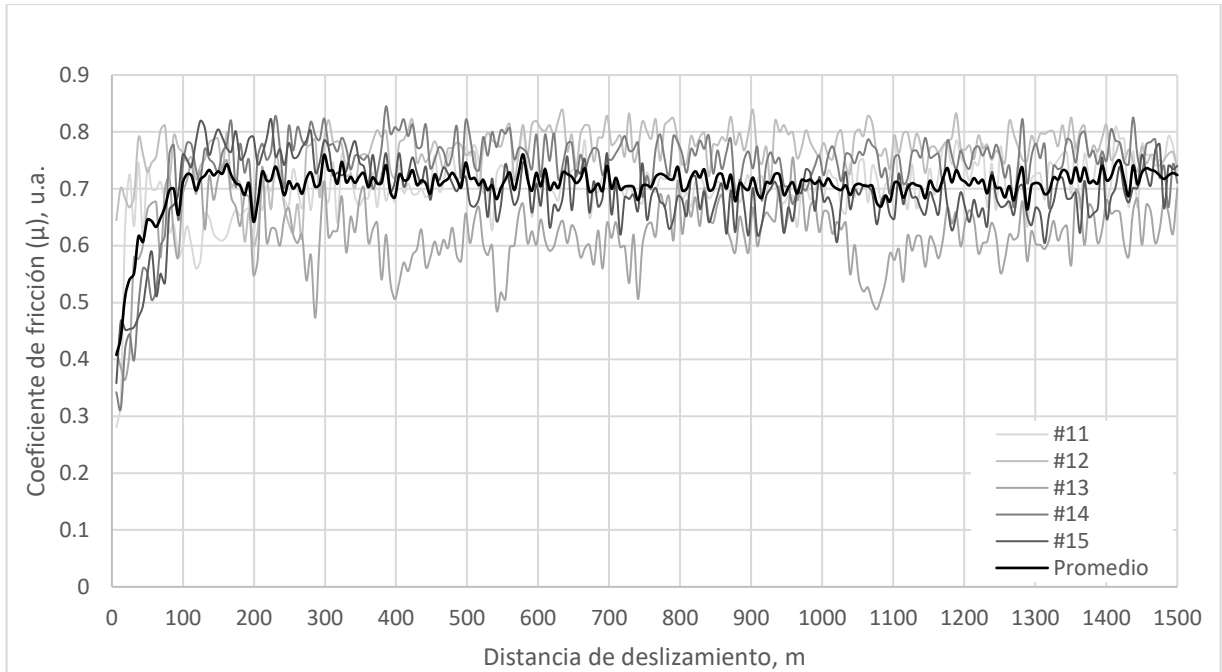


Fig. 3.13. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos con PPT-1 y una espiga de acero SAE O1, con carga de 5 N y distancia de deslizamiento de 1,500 m.

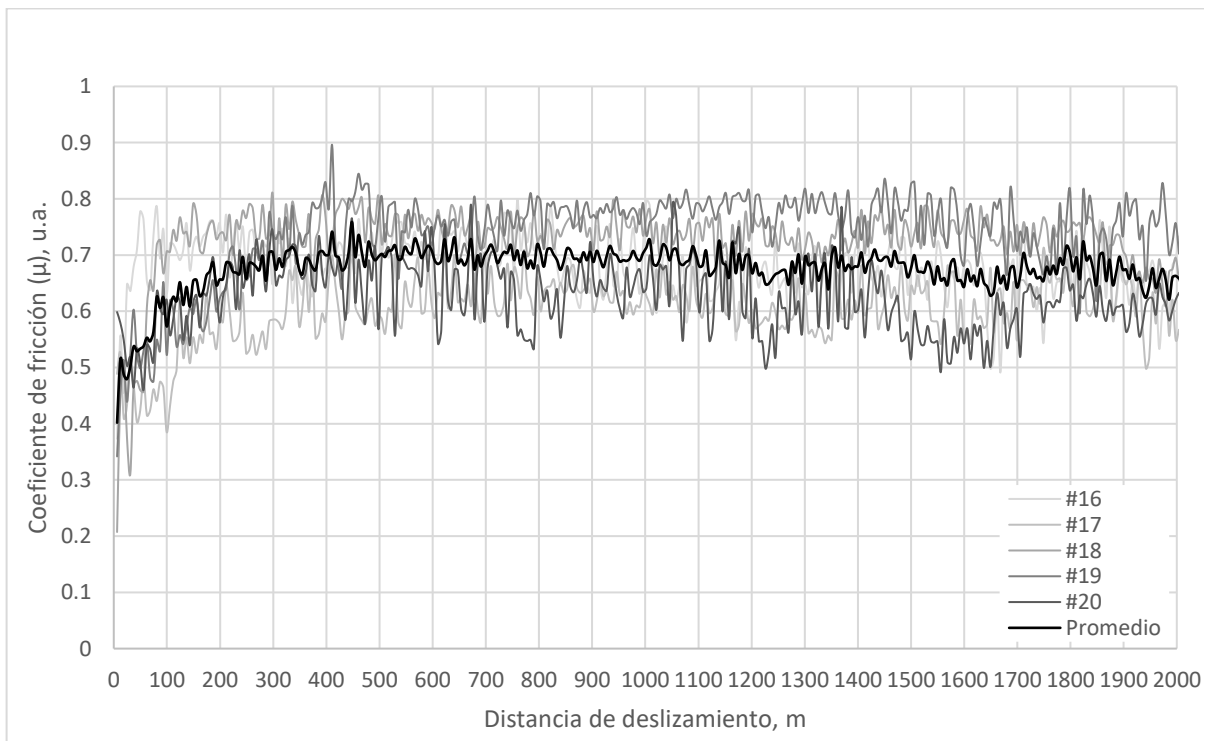


Fig. 3.14. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos con PPT-1 y una espiga de acero SAE O1, con carga de 5 N y distancia de deslizamiento de 2,000 m.

### **3.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Después de obtener y presentar los resultados obtenidos mediante los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco y de las mediciones de pérdida de masa de los diferentes discos y espigas, se procede a realizar el tratamiento 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.

#### **3.4.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DESGASTE**

En las Tablas 3.4 - 3.7 se presentan el análisis estadístico de los valores de desgaste (diferencia de peso) tanto para los discos como también para la espiga.

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

Es evidenciable la diferencia del desgaste entre los discos de acero SAE 1020 con recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PPT-1 y con PPT-2 con respecto al incremento de la distancia de deslizamiento, no así para la espiga de acero O1 que presenta una pérdida de masa similar en las mismas distancias de deslizamiento de los discos con PPT-1 y PPT-2.

En las Tablas 3.4 y 3.5 se observa una clara tendencia de incremento en la media de desgaste a medida que aumenta la distancia de deslizamiento, lo que es esperable bajo condiciones de desgaste continuo.

La relación parece ser prácticamente lineal, lo que implica que el material sufre un desgaste progresivo. Es claro que los valores medios de desgaste en los discos con PPT-2 son consistentemente más bajos en comparación con los discos con PPT-1. Esto indica que los discos sometidos al PPT-2 tienen una mejor resistencia al desgaste en comparación con PPT-1.

En los discos con PPT-1, la alta desviación estándar en las distancias de deslizamiento medias indica que hay una mayor variabilidad en los valores de desgaste en ese punto, aunque en el ensayo de 2,000m, los valores de desgaste se vuelven más consistentes y cercanos a la media. En los discos con PPT-2. La desviación estándar es consistentemente más baja que en los discos con PPT-1, lo que refuerza la idea de un desgaste más controlado.

En los discos con PPT-1 el coeficiente de variación muestra una clara tendencia a la disminución conforme aumenta la distancia de deslizamiento, lo que indica que el desgaste en los ensayos de mayor duración es mucho más consistente. Esto puede sugerir que los datos son más predecibles y uniformes en distancias de deslizamiento más grandes. En los discos con PPT-2 el coeficiente de variación es más bajo que en los discos con PPT-1, lo que muestra que la dispersión relativa de los datos es más baja.

Aunque el error estándar en los discos con PPT-1 es bajo, se observa que a las distancias de deslizamiento de 1,000 m y 1,500 m hay más variabilidad en los datos, lo que podría ser resultado de fluctuaciones en el desgaste que hacen que la media sea ligeramente menos precisa para estas condiciones.

Las estimaciones de la media en ambos conjuntos de ensayos son buenas, aunque los datos de discos con PPT-2 ofrece un nivel mayor de precisión. Esto sugiere que los datos de los discos con PPT-2 son más consistentes en cuanto a su comportamiento de desgaste.

En la Fig. 3.15. se presenta la curva de pérdida de masa en función de la distancia recorrida, para los discos con PPT-1 y los discos con PPT-2, tal como se citó en la sección sobre “Desgaste Inicial” una vez terminada la etapa transitoria de desgaste, la cual ocurre en los instantes iniciales del desgaste, se da paso a la etapa estacionaria, donde el desgaste es directamente proporcional a la distancia de deslizamiento

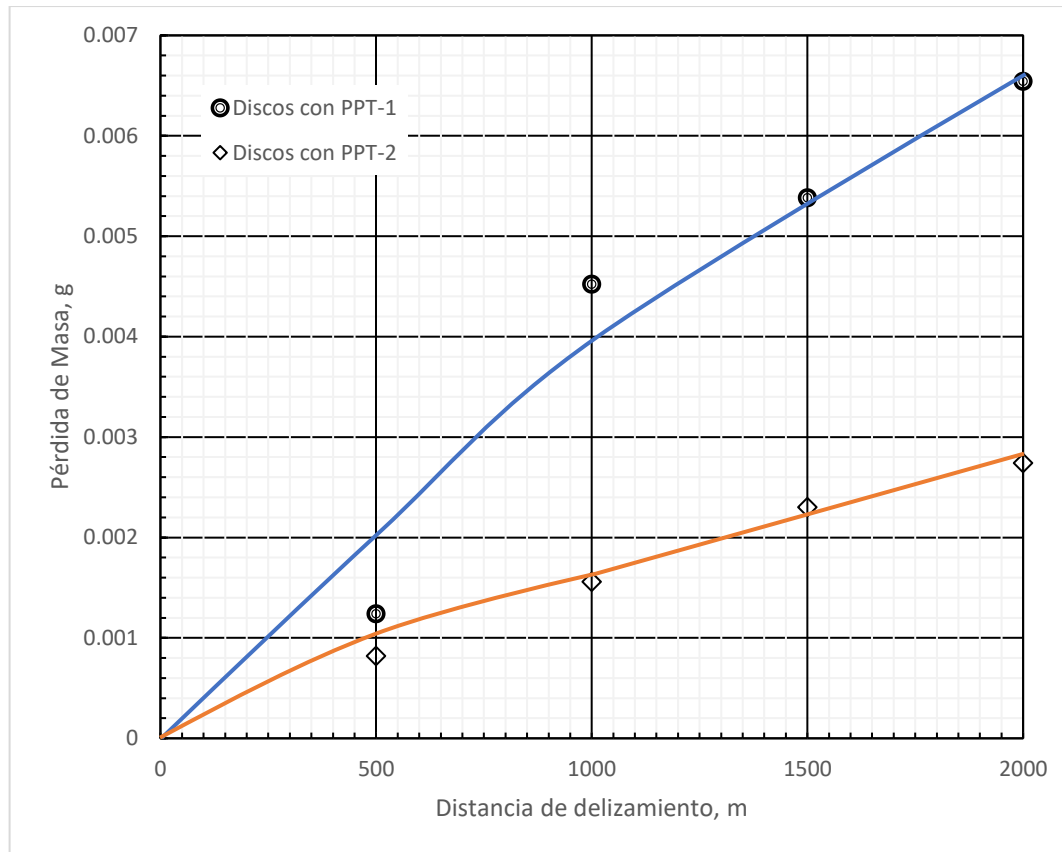


Fig. 3.15. Curva de pérdida de masa respecto a la distancia de deslizamiento.

En la Tablas 3.6 - 3.7, el análisis del desgaste de las espigas revela que el desgaste aumenta con la distancia de deslizamiento como es de esperarse, siendo ligeramente mayor en las espigas que interactuaron junto al los discos con PPT-2.

El error estándar es bajo en ambos casos, lo que asegura que la media tiene un buen grado de precisión. El coeficiente de variación disminuye con al aumentar la distancia de deslizamiento, mostrando que los datos se vuelven más consistentes y predecibles a medida que avanza el ensayo.

### 3.4.2. ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN

De las Figs. 3.7 a 3.14, se presenta que existe una tendencia al incremento del coeficiente de fricción en los primeros 200 m de deslizamiento; aunque generalmente se mantuvo fluctuante entre los valores obtenidos durante los restantes metros de

deslizamiento en cada uno de los ensayos, con su respectivo tratamiento térmico. En las Tablas 3.8. y 3.9, se presentan los valores promedio de coeficiente de fricción obtenidos para cada distancia de deslizamiento y condiciones de tratamiento térmico del ensayo.

En ambas condiciones de post tratamiento, los coeficientes de fricción promedio siguen una tendencia similar, con un aumento inicial y una ligera reducción en los ensayos más largos. Sin embargo, los discos con PPT-2 tienden a presentar valores de fricción ligeramente mayores que PPT-1 en las primeras etapas de los ensayos, lo que sugiere una mayor resistencia al deslizamiento en los discos tratados con PPT-2.

Además, la desviación estándar en PPT-2 es más alta desde el inicio, indicando una mayor variabilidad en los valores de fricción, lo que podría reflejar un comportamiento inconsistente bajo ciertas condiciones de ensayo.

Tabla 3.8. Valores promedio del coeficiente de fricción entre pares de discos con recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PPT-1 y espigas de acero SAE O1 con una carga de 5 N.

Distancia recorrida, m	N° de disco	Coeficiente de fricción promedio por ensayo, $\mu$	Coeficiente de fricción promedio, $\mu$	Desviación estándar
500	1	0.67400	0.67583	0.01568
	2	0.69376		
	3	0.67313		
	4	0.65239		
	5	0.68590		
1,000	6	0.68267	0.64075	0.06986
	7	0.67714		
	8	0.66089		
	9	0.51674		
	10	0.66631		
1,500	11	0.68067	0.70449	0.01768
	12	0.69897		
	13	0.69874		
	14	0.72063		
	15	0.72345		
2,000	16	0.64555	0.63141	0.05748
	17	0.70258		
	18	0.59881		
	19	0.55261		
	20	0.65749		

Tabla 3.9 Valores promedio del coeficiente de fricción entre pares de discos con recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PPT-2 y espigas de acero SAE O1 con una carga de 5 N.

Distancia recorrida, m	N° de disco	Coeficiente de fricción promedio por ensayo, $\mu$	Coeficiente de fricción promedio, $\mu$	Desviación estándar
500	1	0.71128	0.68930	0.03129
	2	0.71262		
	3	0.68937		
	4	0.63612		
	5	0.69712		
1,000	6	0.64061	0.63300	0.03099
	7	0.65592		
	8	0.64649		
	9	0.57853		
	10	0.64348		
1,500	11	0.70254	0.70509	0.05638
	12	0.76690		
	13	0.61995		
	14	0.74357		
	15	0.69247		
2,000	16	0.68109	0.67587	0.05946
	17	0.60576		
	18	0.72821		
	19	0.73864		
	20	0.62568		

## CONCLUSIONES

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

- Los recubrimientos autocatalíticos de Ni-P con post-tratamiento térmico a 200 °C más a 400 °C (PPT-2) depositados en discos de acero SAE 1020 y utilizando espigas de acero SAE O1 con tratamiento térmico de temple y revenido, presentan mayor resistencia desgaste que los recubrimientos autocatalítico de Ni-P con post-tratamiento térmico a 200 °C (PPT-1) depositados en el mismo tipo substrato y el mismo tipo de espigas, debido a la mayor dureza que presenta los recubrimientos de Ni-P con PTT-2.
- Las pérdidas de masa de las espigas de acero SAE O1 cuando se utilizan discos de acero SAE 1020 con recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PTT-1, son significativa menor que cuando se utilizan discos de acero SAE 1020 con recubrimiento autocatalítico de Ni-P con PTT-1 debido a la alta dureza que presenta estos últimos recubrimientos.
- Los coeficientes de fricción se incrementan rápidamente en los primeros instantes de los ensayos de desgaste espiga sobre disco, lo cual se puede atribuir al proceso de asentamiento entre las superficies en contacto, ya que estas se van ajustando y acoplando. Posteriormente, el sistema alcanza un estado de equilibrio, presentando un comportamiento más estable del coeficiente de fricción.
- A medida que se incrementa la distancia de deslizamiento, el desgaste aumenta en ambas condiciones. Sin embargo, el coeficiente de variación disminuye, lo que indica que, en distancias grandes, el desgaste es más uniforme y los datos son más predecibles. Esto sugiere que los discos, bajo condiciones de fricción prolongadas, alcanzan un estado de desgaste más estable.

- El espesor del recubrimiento es uniforme y se adapta a las irregularidades que pueda tener la probeta antes del proceso de deposición. Sin embargo, el espesor tiende a disminuir en la medida que disminuye la agitación del baño.
- La segunda etapa del PTT-2, es decir el post-tratamiento térmico a 400 °C durante 1 h, realizado al recubrimiento autocatalítico de Ni-P es efectiva al obtener un aumento considerable en el valor de HK 397.49, en comparación con el obtenido con post-tratamiento térmico a 200 °C durante 1 h (PTT-1) el cual es un valor de HK 254.87.
- Ha sido de mucha importancia disponer de equipos de laboratorio tanto con alto nivel de control de los ensayos como también de los resultados obtenidos, ya que la dispersión de los resultados se puede atribuir en gran medida a las características propias de los recubrimientos obtenidos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sarkar, A.D. (1990). Desgaste de metales. (1.<sup>a</sup> ed.) D.F.; México:
- [2] Lazo Arias, V. (2020). Estudio de desgaste en un acero AISI 1045 templado y revenido a baja y alta temperaturas, utilizando espigas de acero AISI O1 con punta semiesférica. Universidad de El Salvador. El Salvador.
- [3] Bowden F.P y Tabor D, (1964). The friction and lubrication of solids, Part 1 Oxford University Press.
- [4] Bowden F.P, Moore J.W y Tabor D. (1943). JI Appl Physics.
- [5] Tomlinson, G.A. (1929). Philosophical magazine 7, 7, (46) 905.
- [6] Holm, R. (1946). Electrical Contacts
- [7] Burwell, J.T. y Strang, C.D. (1952), JL Appl Physics, 23, 18.
- [8] Rowe, C.N, Trans ASLE, (1966), 9, 101.
- [9] García, J.E., González, E.R. & Villatoro, R.C. (2003). Diseño y construcción de una máquina para ensayo de desgaste tipo espiga sobre disco. Universidad de El Salvador. El Salvador.
- [10] Lancaster, J.K. (1957). Proceedings of the physical society.
- [11] Hirst W y Lancaster J K (1960). Proceedings of the Royal Society A, 259, 228.
- [12] International ASTM, A. (s.f.). Norma G 99-17.
- [13] Wurtz, C, R. (1844). Seances Acad. Sci.
- [14] Breteau. P. (1911). Bull. SOC. Chim., p. 9.
- [15] Brenner, A. & Riddell, G. (1946). Nickel plating on steel by chemical reduction, Journal of Research of the National Bureau of Standards.
- [16] Acero, L.A. & Fernández A.D. (2005). Estudio del daño acumulado en el comportamiento a la fatiga de la aleación de aluminio 6063 condición T6 recubierto con un depósito autocatalítico de Ni-P. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- [17] Mallory, G.O. y Hajdu, J.B. (1990). Electroless plating: fundamentals and applications.
- [18] Wang, K. (2008). Development of lead-free electroless nickel plating systems and metal thin films on silicone and nafion membranes [a thesis submitted for the degree of doctor]. National University of Singapore.

- [19] Berríos, J. A. (1998). Comportamiento a la fatiga de un acero al carbono AISI 1045 recubierto con depósitos autocatalíticos de Ni-P. Universidad Central de Venezuela. Venezuela.
- [20] Taheri. R. (2003). Evaluation of Electroless Nickel-Phosphorus (EN) Coatings, Ph. D. thesis, University of Saskatchewan.
- [21] Baldwin, C. & Such, T. (1968). Plating rates and physical properties of electroless nickel/phosphorus alloy deposits, Trans. Inst. Met. Finish.
- [22] Reidel, W. (1997), Electroless Nickel plating, ASN International.
- [23] Fields, W., and Zickearff J.R. (1984). Electroless, Publication of ASM committee on EN plating.
- [24] Malecki, A. & Micek-Ilnicka A. (2,000). Electroless nickel plating from acid bath, Surf. Coat. Technol.
- [25] Gawrilov, G.G. (1979); Chemical Nickel Planting, Portcullis press, Redhill, UK.
- [26] Alirezaei, S., Monirvaghefi, S. M., Salehi, M., & Saatchi, A. (2007a). Wear behavior of Ni-P and Ni-P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> electroless coatings.
- [27] León, O., Staia, M., & Hintermann, H. (2003). High temperature wear mechanism of Ni-P-BN(h) composite autocatalytic coatings.
- [28] Argueta, R.A., Vásquez, C.O. & Palma, C.A. (2002). Diseño y construcción de un sistema para la deposición autocatalítica de recubrimientos de Ni-P. Universidad de El Salvador. El Salvador.
- [29] Keyse, R. J. & y Hammond, C. (1.987). *Materials Science and Technology*, V 3. p-p 963-972.
- [30] Berríos-Ortiz, J.A., Staia, M.H. & Puchi-Cabrera, E.S. (2005). Comportamiento a la fatiga de un acero al carbono AISI 1045 recubierto con depósitos Autocatalíticos de Ni-P. *Revista de la Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela*.
- [31] ASTM Designation: B 656-91, V 2 (5) (1.997) p-p 373-380.
- [32] Alberto, L.F., Gavarrete, C.R., & Orellana, J. (2015). Estudio del comportamiento a la fatiga al aire y fatiga corrosión de un acero AISI 1020 con recubrimiento autocatalítico de Ni-P. Universidad de El Salvador. El Salvador.
- [33] Avner, S.H. (1988). Introducción a la Metalurgia Física. (2.<sup>a</sup> ed.). México: McGraw-Hill.

- [34] Staia, M.H., Puchi-Cabrera, E.S., Carrasquero, E., Santana Méndez, Y.Y., La Barbera Sosa, J.G. & Chicot, D. (2013). Sliding wear of a-C:H coatings against alumina in corrosive media. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- [35] Berríos, J.A., Staia, M.H., Hernández, E.C., Hinterman, H. & Puchim E.S. (1998). Effect of the thickness of an electroless Ni-P deposit on the mechanical properties of an AISI 1045 plain carbon steel. *Surface & Coatings Technology*. Vol 108-109, p-p 466-472.
- [36] Guzmán, C., Díaz, N., Berríos, J.A., Pertuz, A., & Puchi Cabrera, E.S. (2000). Fatigue properties of a SAE 4340 steel coated with a Nimet HP autocatalytic nickel deposit. *Surface & Coatings Technology*. Vol 133-134, p-p 561-571.