

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



**ESTUDIO DE DESGASTE EN UN ACERO SAE 3115 SIN Y CON
CEMENTACIÓN UTILIZANDO CARBÓN VEGETAL DE
BÁLSAMO TEMPLADO Y REVENIDO**

PRESENTADO POR:

**JOSÉ DAVID ESTEVEZ AYALA
JOSUÉ ALEXANDER LINARES LINARES
LUDWIN ANÍBAL REVELO POZO**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, MARZO 2025

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

M.Sc. 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 DE DESGASTE EN UN ACERO SAE 3115 SIN Y CON
CEMENTACIÓN UTILIZANDO CARBÓN VEGETAL DE
BÁLSAMO TEMPLADO Y REVENIDO**

Presentado por :

**JOSÉ DAVID ESTEVEZ AYALA
JOSUÉ ALEXANDER LINARES LINARES
LUDWIN ANÍBAL REVELO POZO**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

San Salvador, marzo de 2025

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

Tribunal Calificador:

F. _____

Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz

F. _____

Ing. Francisco Alfredo De León Torres

F. _____

Ing. Rigoberto Velásquez Paz

DEDICATORIA

La culminación de este trabajo de graduación está dedicada en primer lugar a Dios, luego a todas las personas que me ayudaron a alcanzar este tan anhelado título.

A mis padres: **José Francisco Estevez** y **Guadalupe Esperanza Ayala**, por su amor desmedido y su sacrificio.

A mis amigos, por su compañía y su sincera amistad con el pasar de los años.

David Estevez

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mi madre, quien siempre ha sido un ejemplo a seguir para mí, por su amor incondicional, por todos los sacrificios que ha hecho por mí y por animarme y brindarme su apoyo siempre que lo he necesitado. Así mismo, a mis abuelos y a cada uno de mis tíos y tías, ya que sin su ayuda no habría logrado esto; siempre han sido una parte importante en mi vida, y ahora quiero dedicarles este trabajo en agradecimiento. Por último, aunque no menos importante, a mis amigos y demás seres queridos, quienes siempre han estado cuando los he necesitado para darme un consejo, ayudarme y brindarme su apoyo en momentos difíciles.

Josué Linares

DEDICATORIA

Le dedico este trabajo de graduación a:

Mi madrecita chula **María Santos Pozo de Revelo** por darme las palabras afectivas, creer en mí y apoyarme en cada etapa de mi vida.

Mi padre **José Aníbal Revelo Ramírez** por ser la inspiración de muchas de mis elecciones en mi vida recreativa como profesional, por forjarme el carácter y la disciplina.

Mi hermanito **Wilmer Alexis Revelo Pozo**, por ser un excelente hermano y amigo.

Mis abuelitos por brindarme el cariño, por quererme tanto y por corregirme en los momentos necesarios de mi infancia y juventud.

Mi familia en general, por darme palabras de aliento y por siempre desearme lo mejor.

Mis amigos y amigas, por la amistad sincera, por las palabras de apoyo y los buenos momentos compartidos.

Ludwin Revelo

AGRADECIMIENTO

Primero quiero agradecer a Dios, quien cuidó todas mis entradas y mis salidas hasta el día de hoy, y me permitió llegar a esta meta que tanto soñé y se ha hecho realidad, aunque en muchos momentos dudé si tenía la capacidad de terminar esta travesía, en mi interior encontré el aliento que necesitaba para seguir creyendo en mí mismo y esforzándome y por eso agradezco al ser supremo.

Mi más profundo agradecimiento es a mis padres: Francisco Estevez y Guadalupe Ayala, este sueño fue cimentado en mi por ustedes, su disciplina y sus enseñanzas me acompañaron en este camino universitario, sin su apoyo, su sacrificio, su insistencia yo no podría estar culminando este gran trabajo, les agradezco infinitamente que siempre me apoyaron en todos los ámbitos con el pasar de los años, no me bastaría la vida para devolverles lo que me han dado sin esperar nada a cambio, este logro es de ustedes también, porque aunque yo dude en muchos momentos si tenía la madera para lograr esto, ustedes nunca dudaron que yo podría y por eso les agradezco eternamente su trabajo.

A mis amigos Geovanni García y Ariel Borisov, su ejemplo me ayudó a crecer y tomar el verdadero protagonismo en mi rol de estudiante, les agradezco su amistad.

También a mis mascotas, por alguna extraña razón la compañía de mi perro y de mi gata fue muy especial y fundamental en mis largas noches de estudio y esfuerzo, a ustedes les debo mi logro también.

A mi docente asesor Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz, gracias por ayudarnos y guiarnos en la realización de este trabajo el cual me siento muy orgulloso de haber realizado y culminado.

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.

David Estevez

AGRADECIMIENTO

Primeramente, quiero dar gracias a Dios por permitirme culminar esta etapa de mi formación profesional. Agradezco de manera especial a mi madre, por su amor incondicional y constante apoyo en cada paso de este camino. A mis abuelos, por sus sabios consejos y ejemplo de perseverancia, y a mis tíos, por estar siempre presentes con su respaldo incondicional en cada momento. Agradezco profundamente a Iris Ortiz que ha sido un pilar fundamental a lo largo de este proceso, brindándome apoyo incondicional, motivación y comprensión en cada paso del camino. Quiero expresar mi gratitud a todos mis amigos y seres queridos, quienes con su amistad, ánimos y consejos han sido una fuente de inspiración en esta etapa de mi vida.

También, al docente asesor Dr. y M.Sc. Jonathan Berríos, por su valiosa guía. A mis compañeros de grupo, cuyo compañerismo y motivación hicieron posible este trabajo. También agradezco a los compañeros de la UES FMOcc que me han acompañado desde que inicié la universidad y que ahora se han convertido en buenos amigos y personas importantes para mí.

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.

Josué Linares

AGRADECIMIENTO

Primeramente, le agradezco a Diosito, por cuidarme cada día de mi vida, otorgarme la salud, la fuerza física y mental en todo mi desarrollo estudiantil.

A mis padres, Mary y Aníbal, por esforzarse cada día para poder darme la oportunidad de superarme y estudiar mi carrera universitaria, jamás poder pagarles todo lo que han hecho por mí desde el momento de mi nacimiento.

A mi querida amiga Sulma Gómez, por explicarme y ser una profesora más en toda mi etapa estudiantil.

A mi amigo Kevin Chicas, por la amistad sincera y por todas esas tardes-noches de desvelos estudiando y preparando tareas.

A mi segunda familia, mis amigos, los del C.E. Arturo Ambrogi y del I.N. José Damián Villacorta.

Al grupito de siempre de la UES, por las risas y las validas en cada evaluación.

A cada uno de mis profesores, por impartir y compartir sus conocimientos para mi desarrollo educacional.

A mis compañeros de tesis, Josué y David, por hacer un esfuerzo enorme y siempre tratar de sacar adelante este trabajo de graduación.

Al Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz, por brindarnos su conocimiento, guiarnos y corregirnos para realizar un excelente trabajo de graduación.

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.

Ludwin Revelo

ESTUDIO DE DESGASTE EN UN ACERO SAE 3115 SIN Y CON CEMENTACIÓN UTILIZANDO CARBÓN VEGETAL DE BÁLSAMO TEMPLADO Y REVENIDO

Estudiantes: Brs. José David Estevez Ayala¹, Josué Alexander Linares Linares²,
Ludwin Aníbal Revelo Pozo³

Docente Asesor: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz⁴

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 ensayo tipo espiga sobre disco en aceros SAE 3115 sin y con tratamiento termoquímico de cementación sólida con post-tratamiento de temple y revenido. El post-tratamiento térmico de temple se realizó a 875 °C y enfriamiento en aceite y el revenido a 200 °C. El tratamiento termoquímico se realizó utilizando una mezcla 80:20 de carbón vegetal de bálsamo y el activador químico utilizado fue carbonato de bario respectivamente, el tratamiento se realizó bajo las condiciones de temperatura de 900 °C y 8 h de duración. Los ensayos de desgaste se realizaron a 3 cargas aplicadas de 10, 15 y 20 N en combinación con 2 distancias de deslizamiento las cuales son 1,000 y 2,000 m, y en cada condición experimental se ensayaron 3 pares de espiga y disco. Se obtuvo un espesor promedio de capa cementada de 1.532 mm y se determinaron valores promedio de dureza microdureza Vickers de 413.65 HV. Finalmente, se obtuvo una resistencia al desgaste similar en los discos cementados con post-tratamiento de temple y revenido con respecto a los discos de material base debido a que las partículas desprendidas de los discos cementados actuaron como material abrasivo, el coeficiente de fricción se incrementa rápidamente en los instantes que el ensayo empieza el recorrido y posteriormente alcanza un estado de equilibrio.

Palabras claves: Desgaste, cementación, SAE 3115, carbón vegetal, bálsamo.

1 E-mail: davidaka96@hotmail.com

2 E-mail: josuealx58f@gmail.com

3 E-mail: ludrevelo77@gmail.com

4 E-mail: jonathan.berrios@ues.edu.sv

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	..1
1. MARCO TEÓRICO.....	..3
1.1. Proceso del tratamiento termo-químico por cementación sólida.....	..3
1.1.1. Fabricación del acero por cementación en la antigüedad.....	..4
1.1.2. Descripción general del proceso de cementación.....	..5
1.1.3. Descarburización.....	..10
1.1.4. Cementación sólida.....	..12
1.1.5. Mecanismo de formación, estructura y propiedades de la capa cementada.....	..14
1.1.6. Tratamientos térmicos posteriores.....	..27
1.2. Desgaste.....	..35
1.2.1. Antecedentes históricos.....	..37
1.2.2. Desgaste en metales.....	..44
1.2.3. Tipos de desgaste.....	..44
1.2.4. Aplicación de los resultados de desgaste.....	..46
1.2.5. Variables que afectan el proceso de desgaste.....	..47
1.2.6. Efecto de la temperatura y la velocidad.....	..48
1.2.7. Efecto de la carga y la distancia de deslizamiento.....	..48
1.3. Estudio de desgaste.....	..50
1.3.1. Tipos de máquinas para realizar ensayos de desgaste.....	..50
1.3.2. Norma ASTM para ensayo de desgaste.....	..54
1.3.3. Ensayo tipo espiga sobre disco.....	..56
1.3.4. Modelos de máquinas tipo espiga sobre disco.....	..57
1.3.5. Especificaciones del acero SAE 3115.....	..58
1.4. Normativa ambiental sobre tala de árboles.....	..59
1.4.1. Del manejo de los bosques naturales privados.....	..59
1.4.2. Manejo de plantaciones forestales privadas y aprovechamiento permitido....	..59
1.4.3. De la obligación de probar origen de productos forestales.....	..60
1.4.4. Protección forestal.....	..60
2. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	..62
2.1. Diagrama de flujo de la metodología experimental.....	..62
2.2. Dimensionamiento de los discos y espigas para los ensayos de desgaste.....	..64
2.3. Maquinado de los discos.....	..65
2.4. Diseño de la caja para cementación.....	..67

	Pág.
2.5. Tratamiento termoquímico de cementación.....	68
2.5.1. Lijado previo al tratamiento termoquímico de cementación.....	68
2.5.2. Limpieza de los discos.....	69
2.5.3. Preparación de la mezcla carburante.....	69
2.5.4. Distribución de los discos dentro de la caja.....	70
2.5.5. Tratamiento termoquímico de cementación de los discos.....	71
2.5.6. Etapa posterior del proceso de cementación.....	71
2.6. Post-tratamiento térmico de los discos.....	71
2.7. Tratamiento térmico de las espigas.....	72
2.8. Preparación previa al ensayo de desgaste tipo espiga sobre disco.....	74
2.9. Ensayo de desgaste tipo espiga sobre disco.....	76
2.10. Determinación de dureza.....	80
2.11. Medición del espesor de la capa cementada.....	81
3. ENSAYOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	85
3.1. Resultados de los espesores de la capa cementada.....	85
3.2. Determinación de la dureza.....	89
3.3. Resultado de los ensayos de desgaste.....	92
3.4. Análisis de resultados.....	102
3.4.1. Análisis de desgaste.....	102
3.4.2. Análisis de coeficiente de fricción.....	107
4. DETERMINACIÓN DE COSTOS.....	109
4.1. Costo de materia prima.....	109
4.1.1. Costos de la producción de la mezcla carbón vegetal-activador.....	109
4.1.2. Costo de la caja para cementación.....	111
4.1.3. Costo del acero para los discos y espigas.....	111
4.1.4. Costo de materiales consumibles para la preparación de los discos.....	112
4.2. Costo del uso de equipos.....	113
4.2.1. Costos del uso de equipos para preparación de discos para cementación..	113
4.2.2. Costos del uso del horno.....	116
4.2.3. Costos del uso de equipos para preparación de discos para caracterización y ensayos.....	117
4.2.4. Costos del uso de equipos para caracterización (durómetro, microscopio, lupa).....	118
4.3. Costo de la mano de obra de la investigación.....	121
4.3.1. Costo de preparación de la mezcla carbón vegetal-activador.....	122
4.3.2. Costo de fabricación de la caja para la cementación.....	122

	Pág.
4.3.3. Costo de mano de obra de preparación de discos para cementación.....	123
4.3.4. Costo de mano de obra del proceso de cementación	123
4.3.5. Costo de mano de obra de preparación de discos para caracterización y ensayos.....	124
4.3.6. Costo de mano de obra de la caracterización.....	124
4.3.7. Costo de mano de obra de los ensayos de desgaste.....	125
4.4. Resumen de los costos de la investigación.....	126
 CONCLUSIONES.....	 127
 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y OTRAS FUENTES.....	 129

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1. Clasificación general de los diferentes tipos de tratamientos termoquímicos de los metales y las aleaciones.....	4
Fig. 1.2. Acero al 0.20% de C, cementado a 927 °C durante 6 h y enfriando en horno, atacado químicamente con nital al 2%, 30x.....	8
Fig. 1.3. Gradiente de concentración en un acero con 0.08 pulg de porción externa total.....	9
Fig. 1.4. Relación del tiempo y la temperatura con la profundidad de la porción externa.....	9
Fig. 1.5. Capa descarburizada de un acero de alto carbono recocido. Atacado químicamente con nital al 2%, 200x.....	11
Fig. 1.6. Esquema del diagrama Fe - Fe ₃ C. La región sombreada corresponde a las concentraciones recomendables de carbono en la superficie de la capa cementada. Austenita (A); ferrita (F); y perlita (P).....	16
Fig. 1.7. Esquema de variación de la concentración de carbono en el espesor de la capa cementada en función de la duración del proceso de saturación a 950 °C.....	17
Fig. 1.8. Microestructura de la capa cementada en el acero, 200x.....	18
Fig. 1.9. Dependencia de $D = f/T$ para la difusión de carbono.....	20
Fig. 1.10. Influencia de los elementos de aleación en: a) La energía de activación (Q); y b) en el coeficiente de difusión del carbono en la austenita a 1,100 °C.....	21
Fig. 1.11. Distribución de carbono en el espesor de la capa cementada.....	23
Fig. 1.12. Capa exterior descarburada (color blanco) de una pieza que se ha cementado, 100x.....	25
Fig. 1.13. Capa periférica de una pieza cementada y templada de un acero Cromo-Níquel, 200x.....	25
Fig. 1.14. Agujas de martensita sobre un fondo de austenita retenida, correspondiente a la zona periférica, 1,000x.....	25
Fig. 1.15. Ensayo de microdureza Vickers en la sección transversal de un acero cementado y templado, 100x.....	27
Fig. 1.16. Ensayo de microdureza Vickers en la sección transversal de un acero cementado y templado, 500x.....	27
Fig. 1.17. Tratamientos posteriores a la cementación.....	29
Fig. 1.18. Distintos tratamientos térmicos en la cementación de los aceros. Esquema de la variación de temperatura-tiempo.....	30
Fig. 1.19. Dureza y tenacidad de un acero 4140 después de revenido durante una h a diferentes temperaturas.....	34
Fig. 1.20. Disposición de los átomos en las redes cristalinas: a) Estructura tetragonal centrada en el cuerpo; y b) estructura cúbica centrada en el cuerpo.....	35
Fig. 1.21. Esquemas de las disposiciones experimentales de Leonardo Da Vinci en sus estudios sobre fricción: a y b) Estudio de fricción en superficie plana c) Estudio de fricción sobre un cilindro rodando sobre superficie plana, y d) Estudio de fricción de un objeto arrastrado por una cuerda.....	39
Fig. 1.22. Cojinete del primer barco de vapor, 1872.....	41
Fig. 1.23. Cojinete de inicios del siglo XIX.....	41

	Pág.
Fig. 1.24. Comportamiento de la carga a razón del desgaste.....	47
Fig. 1.25. Esquema de máquina tipo espiga sobre mesa oscilante.....	50
Fig. 1.26. Esquema de máquina tipo espiga sobre buje.....	51
Fig. 1.27. Esquema de máquina tipo cilindros cruzados.....	51
Fig. 1.28. Esquema de máquina espiga sobre cilindro.....	52
Fig. 1.29. Esquema de máquina tipo cuatro bolas.....	53
Fig. 1.30. Esquema de máquina tipo espiga sobre disco.....	53
Fig. 1.31. Dibujo esquemático de un sistema típico de prueba de desgaste.....	55
Fig. 1.32. Tribómetro CSEM.....	57
Fig. 1.33. FALEX ISC-200PC.....	58
Fig. 2.1. Diagrama de flujo de la metodología experimental.....	63
Fig. 2.2. Esquema de: a) Disco; y b) espiga.....	64
Fig. 2.3. Torno convencional marca VICTOR.....	65
Fig. 2.4. Pasos del maquinado de los especímenes: a) Cilindrado; b) Corte; c) Refrentado; d) taladrado; y e) rectificado.....	66
Fig. 2.5. Vista de planta de la caja de cementación.....	67
Fig. 2.6. Dimensiones externas de la caja de cementación con su respectiva tapadera: a) Caja y b) Tapadera.....	68
Fig. 2.7. Tamizado del Carbón vegetal de bálsamo: a) Tamices; y b) Carbón vegetal.....	70
Fig. 2.8. Esquemas de los discos y el arreglo con mezcla cementante.....	71
Fig. 2.9. Post-tratamiento térmico: a) Cámara de gas inerte; y b) discos en proceso de temple.....	72
Fig. 2.10. Curva de variación temperatura vs tiempo para el tratamiento térmico de temple y revenido de las espigas de acero SAE O1.....	73
Fig. 2.11. Grupos de espigas empaquetadas antes del tratamiento térmico de temple.....	73
Fig. 2.12. Cilindro de argón y horno utilizados para los tratamientos térmicos.....	73
Fig. 2.13. Temperatura de temple para las espigas de acero SAE O1.....	74
Fig. 2.14. Temperatura de revenido para las espigas de acero SAE O1.....	74
Fig. 2.15. Superficie lijada de los discos.....	75
Fig. 2.16. Limpieza de discos en cámara ultrasónica marca BRANSON: a) Inicio de limpieza; y b) Final de limpieza.....	76
Fig. 2.17. Módulo para ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco marca GUNT, TM 260.3.....	76
Fig. 2.18. Esquema de módulo para ensayos tipo espiga sobre disco con sus principales componentes.....	77
Fig. 2.19. Pesaje en una balanza analítica disco y espiga: a) Peso final de disco; y b) Peso final de espiga.....	78
Fig. 2.20. Durómetro marca INNOVATEST.....	81
Fig. 2.21. Penetrador de diamante y de geometría cónica.....	81

	Pág.
Fig. 2.22. Corte de la muestra metalográfica a preparar para la medición del espesor de la capa cementada.....	82
Fig. 2.23. Máquina pulidora para realizar el pulido de espejo.....	82
Fig. 2.24. Microscopio óptico marca Leitz Metallovert.....	83
Fig. 2.25. Equipos utilizados para caracterizar la capa cementada.....	84
Fig. 3.1. Ubicación de los discos para medir espesores de la capa cementada.....	86
Fig. 3.2. Secuencias de las 4 mediciones del espesor de la capa cementada de la probeta 1.....	87
Fig. 3.3. Secuencias de las 4 mediciones del espesor de la capa cementada de la probeta 14.....	88
Fig. 3.4. Fotografía a un aumento de 500x en la zona de: a) la primera medición del borde del disco; y b) la primera medición del interior del disco.....	89
Fig. 3.5. Gráfico de la distribución de la microdureza encontrada en los discos.....	90
Fig. 3.6. Fotografía de las indentaciones de las pruebas de dureza en muestra del disco 1.....	91
Fig. 3.7. Fotografía de las indentaciones de las pruebas de dureza en muestra del disco 14.....	91
Fig. 3.8. Gráfico de la pérdida de masa en discos material base.....	92
Fig. 3.9. Gráfico de la pérdida de masa promedio en discos cementados.....	93
Fig. 3.10. Gráfico de la pérdida de masa promedio en espigas usadas en ensayos con discos de material base.....	93
Fig. 3.11. Gráfico de la pérdida de masa promedio en espigas usadas en ensayos con discos cementados.....	94
Fig. 3.12. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida en ensayos de desgaste utilizando discos de acero SAE 3115 recocidos y espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas, aplicando carga de 10 N y distancia de deslizamiento de 1,000 m.....	96
Fig. 3.13. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida en ensayos de desgaste utilizando discos de acero SAE 3115 recocidos y espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas, aplicando carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 1,000 m.....	97
Fig. 3.14. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida en ensayos de desgaste utilizando discos de acero SAE 3115 recocidos y espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas, aplicando carga de 20 N y distancia de deslizamiento de 1,000 m.....	97
Fig. 3.15. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida en ensayos de desgaste utilizando discos de acero SAE 3115 recocidos y espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas, aplicando carga de 10 N y distancia de deslizamiento de 2,000 m.....	98

	Pág.
Fig. 3.16. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida en ensayos de desgaste utilizando discos de acero SAE 3115 recocidos y espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas, aplicando carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 2,000 m.....	98
Fig. 3.16. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida en ensayos de desgaste utilizando discos de acero SAE 3115 recocidos y espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas, aplicando carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 2,000 m.....	98
Fig. 3.17. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida en ensayos de desgaste utilizando discos de acero SAE 3115 recocidos y espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas, aplicando carga de 20 N y distancia de deslizamiento de 2,000 m.....	99
Fig. 3.18. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de desgaste utilizando discos de acero SAE 3115 cementados con post-tratamiento térmico de temple y revenido y espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas, aplicando carga de 10 N y distancia de deslizamiento de 1,000 m.....	99
Fig. 3.19. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de desgaste utilizando discos de acero SAE 3115 cementados con post-tratamiento térmico de temple y revenido y espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas, aplicando carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 1,000 m.....	100
Fig. 3.20. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de desgaste utilizando discos de acero SAE 3115 cementados con post-tratamiento térmico de temple y revenido y espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas, aplicando carga de 20 N y distancia de deslizamiento de 1,000 m.....	100
Fig. 3.21. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de desgaste utilizando discos de acero SAE 3115 cementados con post-tratamiento térmico de temple y revenido y espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas, aplicando carga de 10 N y distancia de deslizamiento de 2,000 m.....	101
Fig. 3.22. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de desgaste utilizando discos de acero SAE 3115 cementados con post-tratamiento térmico de temple y revenido y espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas, aplicando carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 2,000 m.....	101
Fig. 3.25. Fotografías de espigas utilizadas en los ensayos de desgaste durante 1,000 m de distancias recorrida sobre discos de acero SAE 3115 recocidos aplicando cargas de: a) 10 N; b) 15 N y c) 20 N.....	106
Fig. 3.26. Fotografías de espigas utilizadas en los ensayos de desgaste durante 2,000 m de distancias recorrida sobre discos de acero SAE 3115 recocidos aplicando cargas de: a) 10 N; b) 15 N y c) 20 N.....	106

Fig. 3.27. Fotografías de espigas utilizadas en los ensayos de desgaste durante 1,000 m de distancias recorrida sobre discos de acero SAE 3115 cementados y con post-tratamiento térmico de temple y revenido aplicando cargas de: a) 10 N; b) 15 N y c) 20 N.....	106
Fig. 3.28. Fotografías de espigas utilizadas en los ensayos de desgaste durante 2,000 m de distancias recorrida sobre discos de acero SAE 3115 cementados y con post-tratamiento térmico de temple y revenido aplicando cargas de: a) 10 N; b) 15 N y c) 20 N.....	106

ÍNDICE DE TABLA

	Pág.
Tabla 1.1. Profundidad de la porción externa en pulg, al carburizar [2].....	10
Tabla 2.1. Condiciones de material y variables bajo las que se realizan los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco.....	78
Tabla 3.1. Resultados de la medición de los espesores de la capa cementada de cada muestra, valores promedio y desviaciones estándar de las muestras y espesores de la capa del proceso.....	86
Tabla 3.2. Valores de microdureza Vickers sobre discos de acero SAE 3115 con tratamiento termoquímico de cementación con post-tratamiento térmico de temple y revenido.....	90
Tabla 3.4. Valores de pérdida de masa en los discos cementados con post-tratamiento de temple y revenido ensayado a desgaste con espiga acero SAE O1.....	95
Tabla 3.5. Valores de pérdida de masa de espigas utilizadas en ensayos de desgaste con disco de acero SAE 3115 recocidos.....	95
Tabla 3.6. Valores de pérdida de masa de espigas utilizadas en ensayos de desgaste con disco cementados.....	96
Tabla 3.7. Valores de pérdida de masa en los discos cementados y ensayado a desgaste con espiga acero SAE O1.....	104
Tabla 3.8. Valores de coeficiente de fricción para los ensayos material base, promedio individual y promedio por combinación de cargas y distancias de deslizamiento.....	108
Tabla 3.9. Valores de coeficiente de fricción para los ensayos de discos cementados, promedio individual y promedio por combinación de cargas y distancias de deslizamiento.....	108
Tabla 4.1. Herramientas y materiales para la producción del carbón vegetal.....	110
Tabla 4.2. Costo de materiales para construir la caja de cementación.....	111
Tabla 4.3. Costo de materia prima para la fabricación de discos.....	111
Tabla 4.4. Costo de consumibles para la preparación de discos.....	113
Tabla 4.5. Total, costo de materia prima.....	112
Tabla 4.6. Porcentaje del valor de la maquinaria luego de su uso o explotación.....	113
Tabla 4.7. Detalle unitario de los distintos costos para la preparación de un disco de acero SAE 3115 para cementación.....	116
Tabla 4.8. Detalle unitario de los distintos costos para la preparación de un disco de acero SAE 1020 para cementación.....	117
Tabla 4.9. Detalle unitario de los distintos costos para la preparación de un disco de acero SAE 3115 para ensayo espiga sobre disco.....	118

	Pág.
Tabla 4.10. Detalle unitario de los distintos costos de utilización de 2 equipos para caracterizar los discos.....	120
Tabla 4.11. Detalle unitario de los distintos costos de utilización de 1 equipo para estudio de desgaste tipo espigas sobre disco.....	121
Tabla 4.12. Total, costos totales de depreciación, local y servicios básicos por disco.....	121
Tabla 4.13. Total, de costos de mano de obra.....	126
Tabla 4.14. Cuadro resumen de los costos de la investigación.....	126

LISTADO DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

- D_0 : Velocidad de difusión
- D_C^y : Coeficiente de difusión
- D_p : depreciación del equipo
- F: Fuerza
- f_f : Fuerza de fricción
- HB: Dureza Brinell
- HV: Dureza Vickers
- L: Valor residual
- M: Masa
- n: Vida útil de la maquina
- P: Costo inicial
- Q: Energía de activación
- r: Radio
- R: Constante universal de los gases
- rpm: Revoluciones por minuto
- S: Distancia de deslizamiento
- SAE: Sociedad de Ingenieros Automotrices
- t: Tiempo
- T: Temperatura
- v: velocidad
- σ_{flex} : Esfuerzo de flexión
- μ : Coeficiente de fricción
- ω : Velocidad angular

INTRODUCCIÓN

El desgaste que se encuentra en los materiales en general luego de su interacción con otros materiales es un fenómeno inevitable que afecta a una amplia gama de componentes y estructuras en diversos sectores industriales y tecnológicos. Desde máquinas industriales hasta dispositivos médicos, el desgaste se puede manifestar de múltiples formas, incluyendo abrasión, adhesión, erosión, y corrosión, entre otros mecanismos. Comprender las causas subyacentes y los factores que influyen en el desgaste es crucial para desarrollar estrategias efectivas de mitigación y prolongar la vida útil de los materiales.

Este trabajo explorará en detalle los diferentes tipos de desgaste, sus efectos en los materiales y las técnicas innovadoras utilizadas para su estudio y control, proporcionando así una visión integral de este complejo fenómeno y su relevancia en la ingeniería de materiales contemporánea. La razón principal de realizar un estudio de desgaste surge de la necesidad de la industria en desarrollar técnicas de mejoramiento de materiales, como es el caso de la cementación, la cual a partir de un material como el acero, puede ser aplicada de tal manera que si el proceso es desarrollado correctamente, el estudio de desgaste tendrá resultados favorables y la industria tendrá éxito en la búsqueda de componentes mecánicos producidos a partir de aceros con características mejoradas para su aplicación. En el ámbito profesional llevar a cabo esta investigación contribuye al crecimiento personal de cada estudiante de manera que se obtiene experiencia valiosa en el ámbito del tratamiento termoquímico y mejora de materiales lo cual resulta ser de mucho provecho para las necesidades de la vida cotidiana y el área de mantenimiento el cual está muy relacionada con los profesionales de la ingeniería mecánica.

En el marco de este trabajo de graduación, la investigación se basó en usar una metodología, preparación de los discos, el cual consiste en maquinarse los discos a ciertas dimensiones, luego ser pulidos mediante distintos procesos y uso de máquinas para obtener un acabado en la superficie, después el tratamiento termoquímico y el post-tratamiento térmico para continuar con el estudio de desgaste tipo espiga sobre disco para obtener el coeficiente de desgaste, tomando en consideración la distancia de

deslizamiento, y seleccionado las espigas que actuarán sobre el disco, así mismo se hará este ensayo sobre discos sin tratamiento para obtener resultados que permitan comparar las piezas con propiedades intrínsecas, es decir, sin y con el tratamiento termoquímico. Posteriormente se lleva a cabo la prueba de indentación donde se obtendrá la dureza superficial del disco, y luego mediante ensayo metalográfico se obtendrá el espesor de la capa cementada.

El trabajo de investigación se desarrolla en 3 capítulos, de tal manera que en el capítulo 1 se encuentra la investigación exhaustiva de las bases teóricas que fundamentan el desarrollo y el diseño de los procesos que se llevaran a cabo, en el capítulo 2 se lleva a cabo la fase experimental donde se crearan los discos los cuales serán objeto de prácticas para tratarlos termoquímicamente y así mismo se llevará a cabo el post-tratamiento térmico, además del estudio de desgaste, en el capítulo 3 se encuentra una vasta cantidad de información del análisis y resultados donde se incluye un análisis estadístico de desgaste y un análisis del coeficiente de fricción.

1. MARCO TEÓRICO

En el ámbito de la metalurgia, la búsqueda constante de mejorar las propiedades y el rendimiento de los aceros ha llevado al desarrollo de procesos innovadores que transforman las características fundamentales de estos materiales. Uno de estos procesos que ha ganado relevancia es la cementación sólida de aceros.

En el presente capítulo se presenta el conjunto de conceptos, definiciones y principios fundamentales para llevar a cabo un estudio de desgaste, así mismo, se presenta la base teórica para llevar a cabo un tratamiento termoquímico a un acero SAE 3115, el cual será acompañado de un post-tratamiento térmico de temple y revenido, de modo que se pueda verificar la efectividad del proceso.

1.1. PROCESO DEL TRATAMIENTO TERMO-QUÍMICO POR CEMENTACIÓN SÓLIDA

La manipulación termoquímica fusiona los procesos térmicos y químicos con el propósito de alterar la composición química, estructura y características de la superficie de un acero. En la Fig. 1.1 se presenta el esquema de la clasificación general de los diferentes tipos de tratamientos termoquímicos de los metales y las aleaciones. Este tratamiento se lleva a cabo mediante la difusión de un metal o una aleación con no metales (C, N, B y otros no metales) o metales (Al, Ce, Zn, etc.) en un medio activo a una temperatura específica [1].

Para aumentar la durabilidad de las piezas de máquinas de mayor responsabilidad, se utilizan ampliamente la carburización (cementación), la nitrocarburización y la nitruración. Se pueden citar como ejemplos las piezas de automóviles y tractores, de maquinaria herramienta, agrícola, textil y otras sujetas a la cementación. La mayoría de los componentes de las máquinas operan en condiciones de desgaste, cavitación, cargas cíclicas y corrosión, a temperaturas elevadas y criogénicas, donde las tensiones máximas se concentran en las capas superficiales del metal [1].

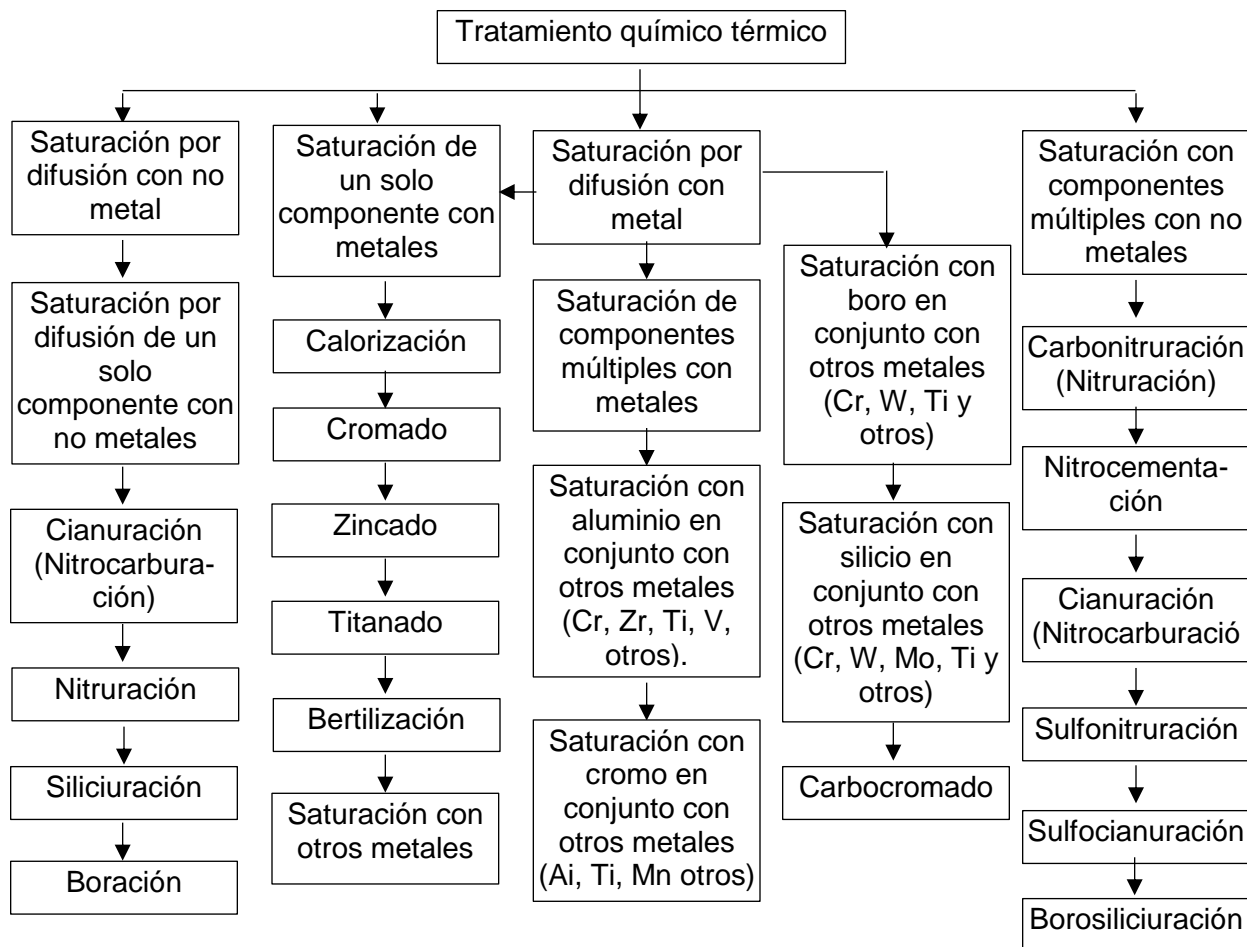


Fig. 1.1. Clasificación general de los diferentes tipos de tratamientos termoquímicos de los metales y las aleaciones [1].

1.1.1. FABRICACIÓN DEL ACERO POR CEMENTACIÓN EN LA ANTIGÜEDAD

La cementación es el más antiguo procedimiento empleado para fabricar acero, consistía en colocar, dentro de unos pequeños crisoles de arcilla, el hierro dulce rodeado con pequeños trozos de carbón vegetal del tamaño aproximado de granos de arroz [2].

Los crisoles (un poco mayores que el puño de una persona) bien cerrados por su parte superior con barro o arcilla, se introducían luego en un fuego o en un horno primitivo, donde se calentaban a temperaturas del orden de 925 a 1,100 °C [2].

Así, el hierro con 0.10% C, calentado a temperaturas superiores a 925° absorbía carbono y se transformaba en acero con 1% C, que se caracterizaba principalmente porque admitía el temple y con ese tratamiento adquiriría una dureza extraordinaria [2].

Este proceso de carburización del hierro por la acción del carbono se realizaba de acuerdo con la siguiente reacción:



En el material aparece un nuevo microconstituyente, el carbono de hierro o cementita (Fe_3C), que junto con la ferrita (Fe) es uno de los constituyentes fundamentales de los aceros [2].

1.1.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE CEMENTACIÓN

La mayor parte de las piezas que componen las máquinas y motores, se fabrican de forma que sus propiedades mecánicas sean bastantes uniformes en toda la masa. Sin embargo, en ciertos mecanismos es necesario que algunas piezas tengan superficies muy duras, resistentes al desgaste y a la penetración, el núcleo central muy tenaz, para poder soportar los choques. Los procedimientos son usados en la actualidad para conseguir estas características, gran dureza y mucha tenacidad, al parecer opuestas entre sí [2].

La cementación, es el más antiguo de todos esos procedimientos de endurecimiento superficial, consiste en aumentar el contenido en carbono en la superficie de las piezas de acero, rodeándolas con un medio carburante, y manteniendo todo el conjunto, durante un cierto tiempo a elevada temperatura. Luego se temple las piezas y quedan con gran dureza superficial. Se pueden emplear cementantes sólidos, líquidos y gaseosos, oscilando la duración de la cementación de 6 a 10 h cuando se utilizan cementantes sólidos, de 1 a 6 h cuando se tratan de sales o cementantes líquidos, y de 1 h a varios días utilizando cementantes gaseosos [2].

Se emplean aceros aleados y sin aleación, de bajo contenido de carbono, generalmente de 0.08 a 0.25% de C y excepcionalmente algunas veces se cementan también aceros hasta de 0.40% de C. La operación se realiza generalmente a temperaturas comprendidas entre 850 y 1,000 °C, siendo las temperaturas próximas a 900 °C las más utilizadas [2].

En el proceso de cementación se pueden distinguir tres etapas fundamentales [2]:

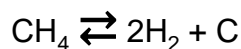
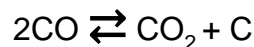
- ✓ Producción de carbono naciente en las proximidades de la superficie del acero
- ✓ Absorción del carbono en la zona periférica del acero
- ✓ Difusión del carbono hacia la zona central.

La cantidad y distribución del carbono absorbido por las piezas dependen de [2]:

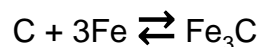
- ✓ La composición del acero sometido a la cementación.
- ✓ La naturaleza de la sustancia cementante.
- ✓ La temperatura y de la duración de la cementación.

En todas las cementaciones el carbono naciente se produce normalmente por descomposición de uno de los dos gases siguiente: óxido de carbono o metano.

Las reacciones fundamentales de formación de carbono naciente son [2]:



El carbono naciente a elevada temperatura en contacto con el acero se disuelve en el hierro y se difunde hacia el interior, de acuerdo con la siguiente reacción que explica la formación del carburo de hierro en el proceso [2]:



Una condición fundamental para que se realice bien la difusión de este carbono hacia el interior, es que el acero se encuentre durante el proceso en fase austenítica, lo

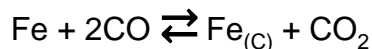
que exige un calentamiento a elevada temperatura, comprendida entre 850 y 1,000 °C [2].

Cuando el acero se encuentra a temperaturas inferiores citadas anteriormente, el hierro se suele presentar en forma de hierro alfa, el cual prácticamente no puede disolver carbono. En cambio, cuando el acero se encuentra en fase austenítica, el hierro se encuentra en gamma que disuelve fácilmente cantidades de carbono variables desde 0.90 a 1.70%. La cementación se debe realizar, por lo tanto, a temperaturas superiores a A_{c_3} [2].

Cuando se cementan aceros de contenido en carbono relativamente elevado (0.20 a 0.40%) la cementación es más lenta que en los aceros de bajo contenido de carbono, porque la velocidad de difusión del carbono de estos aceros es mucho menor que la de los aceros de bajo contenido de carbono [2].

Una pieza después de cementada se puede considerar compuesta por dos zonas principales de composición química diferente; el alma o núcleo central y la periferia o capa cementada, existiendo entre ellas otra tercera zona de transición de menor importancia (ver Fig. 1.2) [2].

La temperatura de carburización usual es de 927 °C. A esta temperatura, tiene lugar la siguiente reacción:



Donde $\text{Fe}_{(\text{C})}$ representa el carbono disuelto en austenita. La máxima cantidad de carbono que se puede disolver en austenita a 927 °C está señalada en el diagrama de equilibrio hierro-carburo de hierro en la línea A. Por tanto, rápidamente se forma una capa superficial de alto carbono (como del 1.2%). Como la parte interna es de bajo contenido de carbono, los átomos de carbono que tratan de alcanzar el equilibrio empezarán a difundir hacia adentro. La rapidez de difusión del carbono en austenita, a una temperatura dada, depende del coeficiente de difusión y del gradiente de concentración del carbono [2].

En condiciones de operación estándar y conocidas, con la superficie a una concentración fija de carbono, se puede predecir la forma del gradiente de carbono, con razonable exactitud, como una función del tiempo transcurrido [2].

Después de que la difusión ha tenido lugar en la parte externa hacia la parte interna, la pieza se saca del horno y se enfría. Si la pieza se enfría en un horno y se examina microscópicamente, el gradiente de carbono puede ser visible en el cambio gradual de la estructura. En la superficie está la zona hipereutectoide de perlita con una red blanca de cementita, seguida sólo por la zona eutectoide de perlita y finalmente la zona hipo eutectoide de perlita y ferrita, con la cantidad de ferrita aumentando hasta que se alcanza la parte interna [2].

La profundidad de la superficie dura se puede medir microscópicamente con un micrómetro ocular. El gradiente de carbono y la profundidad de la superficie dura se pueden determinar experimentalmente colocando la pieza en un torno y maquinando muestras para análisis químico, con incrementos de 0.005 pulg hasta que se alcanza la parte interna. Se hace el análisis para determinar el contenido de carbono y los resultados se pueden graficar como en la Fig. 1.3 [2].

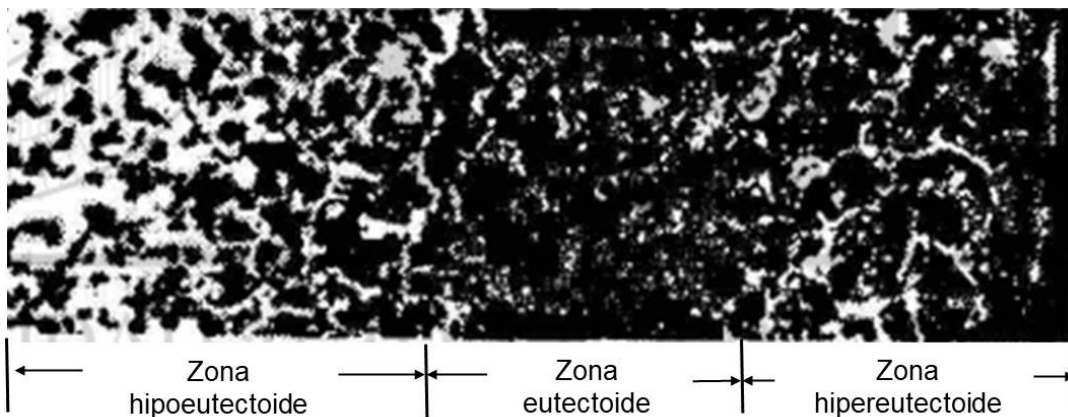


Fig. 1.2. Acero al 0.20% de C, cementado a 927 °C durante 6 h y enfriando en horno, atacado químicamente con nital al 2%, 30x [2].

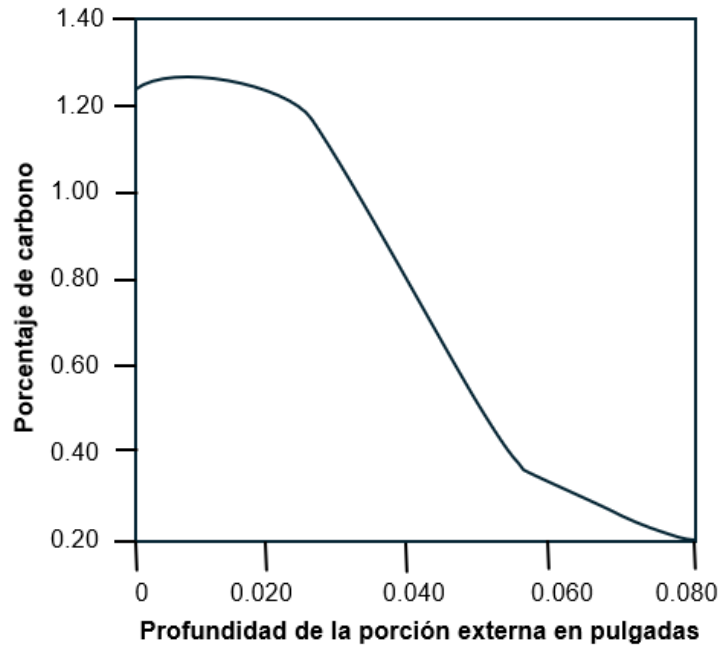


Fig. 1.3. Gradiente de concentración en un acero con 0.08 pulg de porción externa total [2].

En la Fig. 1.4 y en la Tabla 1.1 se presentan la relación de tiempo y temperatura con la profundidad de la parte externa.

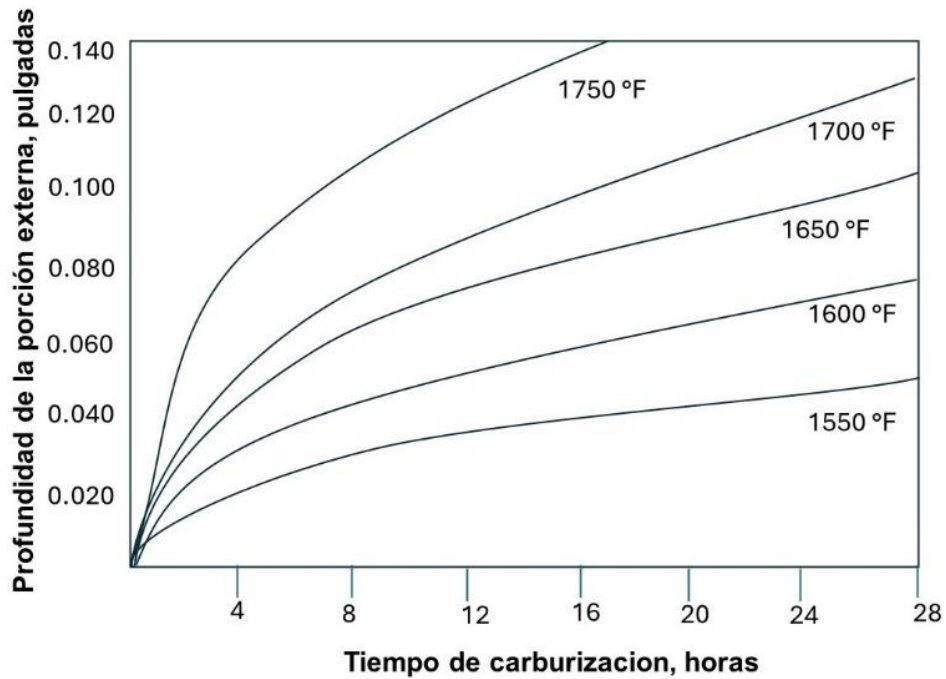


Fig. 1.4. Relación del tiempo y la temperatura con la profundidad de la porción externa [2].

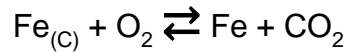
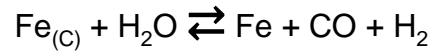
Tabla 1.1. Profundidad de la porción externa en pulg, al carburizar [2].

Tiempo, h	Temperatura, °F					
	1,500	1,550	1,600	1,650	1,700	1,750
1	0.012	0.015	0.018	0.021	0.025	0.029
2	0.017	0.021	0.025	0.03	0.035	0.041
3	0.021	0.025	0.031	0.037	0.043	0.051
4	0.024	0.028	0.035	0.042	0.05	0.06
5	0.027	0.033	0.04	0.047	0.056	0.068
6	0.03	0.036	0.043	0.052	0.061	0.072
7	0.032	0.039	0.047	0.058	0.066	0.076
8	0.034	0.041	0.05	0.06	0.071	0.083
9	0.036	0.044	0.053	0.063	0.075	0.088
10	0.038	0.046	0.055	0.067	0.079	0.093
11	0.04	0.048	0.059	0.07	0.083	0.097
12	0.042	0.051	0.061	0.073	0.087	0.102
13	0.043	0.053	0.064	0.076	0.09	0.106
14	0.045	0.055	0.065	0.078	0.094	0.11
15	0.047	0.057	0.068	0.082	0.097	0.114
16	0.048	0.059	0.071	0.084	0.1	0.117
17	0.05	0.06	0.073	0.087	0.105	0.121
18	0.051	0.062	0.075	0.09	0.106	0.125
19	0.053	0.064	0.077	0.092	0.108	0.128
20	0.054	0.066	0.079	0.094	0.112	0.13
21	0.055	0.067	0.081	0.097	0.114	0.134
22	0.056	0.069	0.083	0.099	0.117	0.138
23	0.058	0.07	0.085	0.101	0.12	0.141
24	0.059	0.07	0.086	0.103	0.122	0.144

1.1.3. DESCARBURIZACIÓN

La reacción de carburización citada anteriormente, $Fe + 2CO \rightleftharpoons Fe_{(C)} + CO_2$, es reversible y puede proceder a la izquierda, eliminando carbono de la capa superficial si el acero se calienta en una atmósfera que contiene bióxido de carbono (CO_2). Esto se llama descarburización [2].

Otras posibles reacciones de descarburización son [2]:



La descarburización es un problema principalmente con los aceros de alto carbono y los aceros para herramienta. La superficie, carente de carbono, no se transformará a martensita en un endurecimiento ulterior, y el acero se dejará con una cubierta suave [2].

Para muchas aplicaciones con herramientas, los esfuerzos a que se somete la pieza en servicio son máximos en la superficie o cerca de ella, de manera que la descarburización es peligrosa. En la Fig. 1.5 se presenta la descarburización en la superficie de un acero de alto carbono [2].

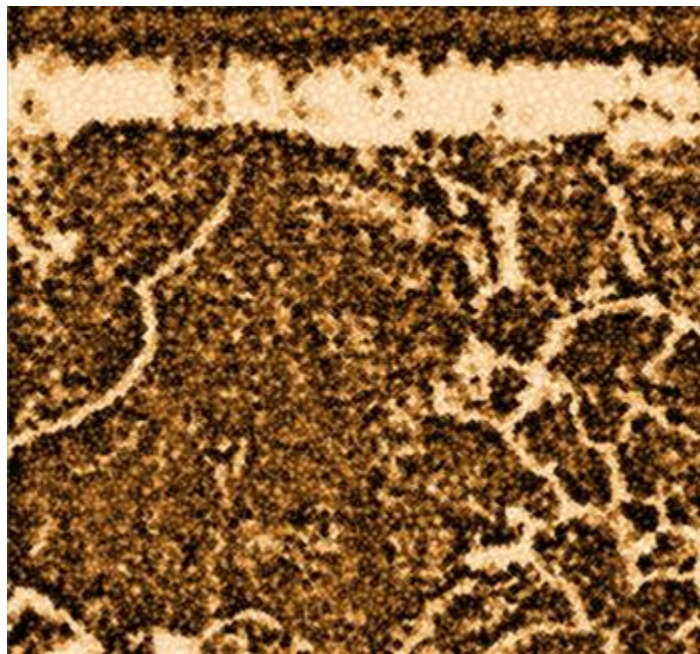


Fig. 1.5. Capa descarburizada de un acero de alto carbono recocido. Atacado químicamente con nital al 2%, 200x [2].

La descarbonización se puede prevenir mediante una atmósfera endotérmica de gas en el horno, a fin de proteger la superficie del acero del oxígeno, del bióxido de carbono y del vapor de agua. Una atmósfera endotérmica de gas se prepara haciendo reaccionar mezclas relativamente ricas de aire y de gas hidrocarburo (por lo general, gas

natural) en un generador calentado externamente en presencia de un catalizador de níquel. El gas producido consta de 40% de nitrógeno, 40% de hidrógeno y 20% de monóxido de carbono [2].

1.1.4. CEMENTACIÓN SÓLIDA

Se utilizan diversas materias para suministrar el carbono que ha de absorber el acero durante la cementación. Las más empleadas suelen ser el carbón vegetal, el negro animal, huesos calcinados, cuero, coque, etc., mezclados con carbonatos de bario, calcio y sodio. El carbón no se emplea porque con él no se suelen conseguir concentraciones de carbono en la periferia del acero, superiores a 0.65% de carbono [3].

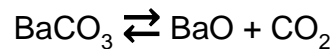
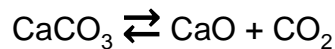
Mezclándolo en cambio con carbonatos alcalinos o alcalinotérreos, en la capa periférica se alcanza fácilmente contenidos hasta de 1.20% de carbono. Durante muchos años, uno de los cementantes más utilizados fue la mezcla Carón preparado con 60% de carbón vegetal y 40% de carbonato bórico. El carbón se tritura en trozos de 3 a 6 mm de diámetro y luego se mezcla con carbonato bórico en polvo. Experimentalmente se ha comprobado que se puede disminuir el porcentaje de carbonato bórico, que se empleaba antiguamente, obteniéndose muy buenos resultados con porcentaje de 10 a 15%, sin que pierda efecto sensible la acción carburante de la mezcla; bajando en cambio de 8%, el rendimiento disminuye ya notablemente [3].

También, se suele añadir 20% de Coque como diluyente, porque facilita la penetración de calor a través del compuesto carburante, permite obtener rápidamente temperaturas uniformes en el interior de las cajas y disminuye el coste de la mezcla.

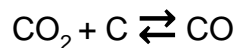
Además, como activadores se suelen emplear, aunque menos frecuente, el carbonato cálcico y el carbonato sódico, es importante que el carbón y los demás materiales que se utilizan para preparar los cementantes sólidos estén bien secos, porque pequeñas trazas de humedad pueden dar lugar a descarbonizaciones locales y luego a puntos blandos en las piezas después del último temple [3].

Como las mezclas cementantes pierden con el uso de su actividad, es necesario renovarlas periódicamente, siendo una práctica muy corriente preparar las mezclas utilizando de 3 a 5 partes de la usada y una de la nueva [3].

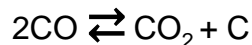
La acción activadora de los carbonatos de calcio, bario y sodio se suelen explicar de forma diferentes, la teoría más antigua y generalizada explica el fenómeno en la siguiente forma: primero se realiza la descomposición de los carbonatos a elevada temperatura de acuerdo con las siguientes reacciones [3]:



Luego el CO_2 producido reacciona con el carbono y produce óxido de carbono:

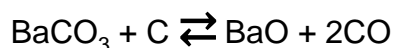


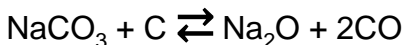
Finalmente, el óxido de carbono se descompone en la superficie del acero según la siguiente reacción:



Dando dióxido de carbono y carbono naciente que pasa al acero [3].

En la actualidad, sin embargo, cada día es más admitida otra hipótesis en cierto modo similar a la anterior, que no señala la formación de CO_2 y atribuye principalmente la acción activadora de los carbonatos a la reacción que se produce a alta temperatura con el carbono formándose óxido de carbono de acuerdo con las reacciones [3]:





Luego el CO producido al descomponerse da lugar al carbono naciente, el cual produce la carburización [3].

Los óxidos BaO y Na₂O que se producen en esas reacciones tienden luego a reaccionar con el CO₂ producido en la descomposición del CO, obteniéndose así los carbonatos correspondientes y con ello se realiza la regeneración de los carbonatos que no se consumen, sino que al ser elementos productores de CO actúan como activadores del proceso de carburización. La presencia de estos óxidos tiende, por lo tanto, a bajar el contenido en CO₂ de los gases y a aumentar el porcentaje de CO, favoreciéndose con todo ello la cementación [3].

Los principales inconvenientes de los cementantes solidos son [3]:

- ✓ La gran duración de la operación.
- ✓ Elevado consumo de carbón
- ✓ Necesidad de mucha mano de obra
- ✓ Dificultad de templar las piezas directamente
- ✓ Irregularidad de temperaturas en las cajas de cementación.

1.1.5. MECANISMO DE FORMACIÓN, ESTRUCTURA Y PROPIEDADES DE LA CAPA CEMENTADA

Se da el nombre de capa cementada a la zona que después de la cementación queda con un contenido de carbono superior a la del acero [1].

Generalmente recibe el nombre de capa dura la zona superficial que después del último tratamiento queda con una dureza superior a 700 Vickers, y que suele corresponder a la zona cuyo porcentaje de carbono es superior a 0.50% C [1].

En algunas ocasiones se presentan dudas en la determinación de la capa dura, porque al emplear diferentes máquinas para el ensayo de dureza y diferentes cargas de ensayo se obtienen también diferentes resultados. Más adelante se explicará los mejores resultados para determinar el espesor de la capa cementada [1].

Los espesores de las capas cementadas que normalmente se emplean en las piezas de máquinas y motores, se pueden clasificar en tres grupos [1]:

- ✓ Capas delgadas con menos de 0.50 mm de espesor de cementación. Estas profundidades de cementación se utilizan para pequeñas piezas de acero al carbono, endurecidas generalmente con sales de cianuro y templadas directamente desde la temperatura de cementación. Estas piezas se deben utilizar siempre sin rectificado posterior.
- ✓ Capas de espesor medio de 0.50 a 1.50 mm. Estos espesores son los más corrientes para la mayoría de las piezas que se utilizan en la fabricación de máquinas y motores. Se pueden obtener empleando cementantes sólidos o gaseosos, con aceros al carbono, débilmente aleados o de alta aleación.
- ✓ Capas de gran espesor, superiores a 1.50 mm. Son obtenidas generalmente por cementantes gaseosos y algunas veces, aunque más raramente, con cementantes líquidos. Las chapas de blindaje se fabrican con chapas cementadas superiores a 3 mm, suelen ser cementadas con gas [1]:

A) Formación de la capa cementada

La difusión del carbono en el acero solo es posible en estado elemental. El carbono atómico que se genera en la atmósfera gaseosa es absorbido por la superficie del acero y se difunde hacia el interior del metal. Si la saturación se lleva a cabo a la temperatura t_1 (ver Fig. 1.6), inferior a la eutectoide, entonces al principio se forma una solución sólida de carbono en el hierro α . Después de alcanzar el límite de saturación del carbono en hierro α (punto a, de la Fig. 1.6), en la superficie se forma cementita. A pesar de la gran movilidad difusiva del carbono, en el hierro α ($Q = 80.26$ kJ/átomo, $D_0 = 0.62 \times 10^6$ m/s) la cementación por debajo de la línea crítica inferior (A_1) no se realiza, puesto que la ferrita disuelve muy poco carbono y la capa cementada prácticamente consta sólo de una capa muy delgada de cementita [1].

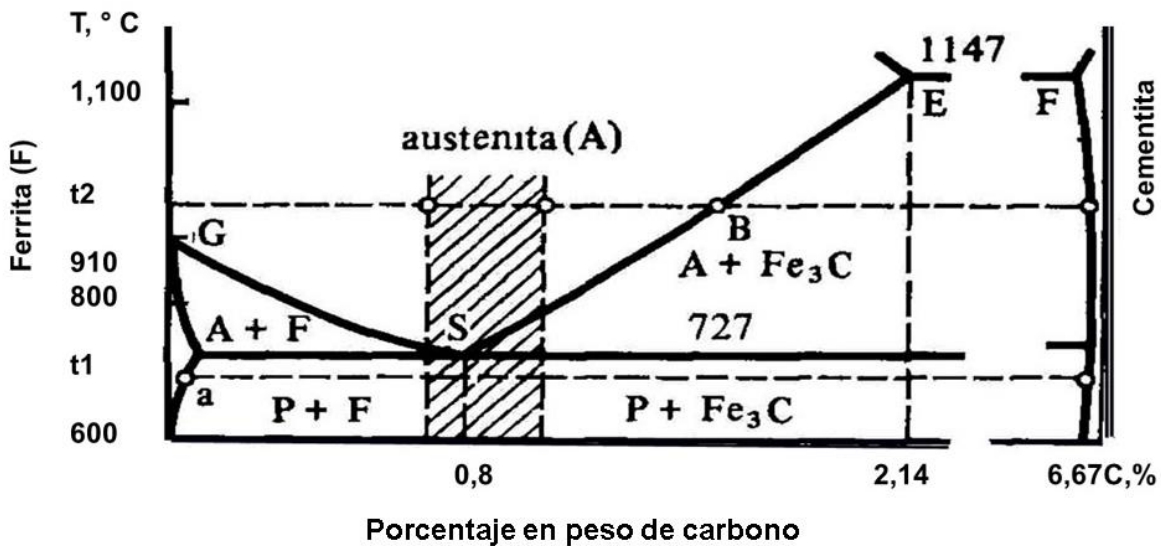


Fig. 1.6. Esquema del diagrama Fe - Fe₃C. La región sombreada corresponde a las concentraciones recomendables de carbono en la superficie de la capa cementada. Austenita (A); ferrita (F); y perlita (P) [1].

La cementación se realiza a temperaturas superiores a la línea crítica superior (A₃). En este caso el carbono se difunde en la red de hierro γ . Cuando la austenita alcanza el límite de saturación con carbono (determinado por la línea SE), en este caso por el punto B, en la superficie se formarán núcleos de cementita. El crecimiento de los núcleos de carburos a lo largo de la superficie transcurre con mayor velocidad que en el interior del metal, a consecuencia en la superficie se forma una capa continua de carburo; a veces la cementita penetra hacia el interior en forma de cristales filiformes bordeando los límites de los granos austeníticos [1].

En la Fig. 1.7 se presenta el comportamiento de distribución de la concentración del carbono en el espesor de la capa difusiva después de la cementación en un carburante activo a distinto tiempo (t). El punto C_{máx} corresponde a la solubilidad máxima del carbono en la austenita, determinada por la línea SE en el diagrama de fases Fe-C. Por ejemplo, a la temperatura t₂, C_{máx} corresponde al punto B [1].

En la industria moderna en el proceso de cementación la capa de carburo, por lo general, no existe y la concentración de carbono en la zona superficial no supera su límite de solubilidad en la austenita para una temperatura obtenida (ver Fig. 1.7). En este caso la difusión se realiza sólo en la austenita, lo cual, en un posterior enfriamiento lento, sufre desintegración formando una estructura ferrito-cementita [1].

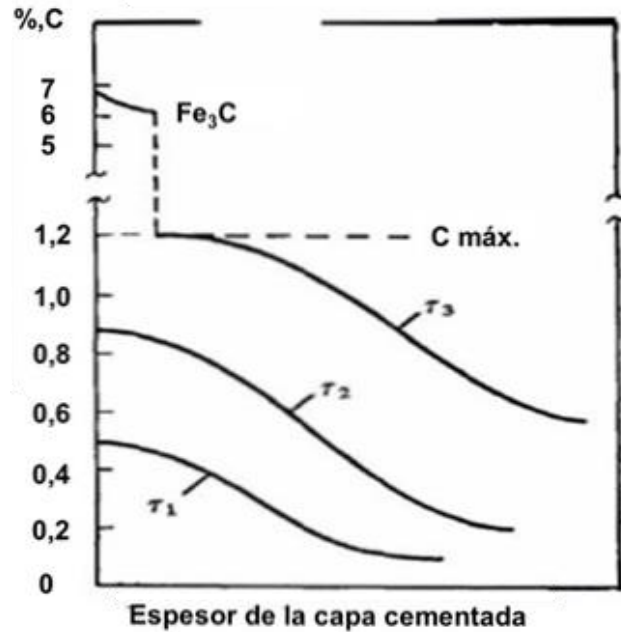


Fig. 1.7. Esquema de variación de la concentración de carbono en el espesor de la capa cementada en función de la duración del proceso de saturación a 950 °C [1].

La capa cementada tiene una concentración variable de carbono, decreciendo desde la superficie al interior de la pieza. Al respecto, después de un enfriamiento lento, en la estructura de la capa cementada se pueden distinguir (de la superficie hacia el interior) tres zonas (ver Fig. 1.8) la hipereutectoide 1, constituida por perlita y cementita proeutectoide secundaria que forma una red en el grano antiguo de austenita; la eutectoide 2, que consta, prácticamente, de solo perlita; y la hipoeutectoide 3, de perlita y ferrita [1].



Fig. 1.8. Microestructura de la capa cementada en el acero, 200x [1].

Cuando la concentración de carbono en la superficie de la capa es alta (entre 1.2 y 1.3%), se forma una red rica en cementita o ésta se desprende en forma de agujas, lo cual influye negativamente en la resistencia mecánica de la capa difusiva (zona de transición) [1].

En lo que se refiere al tratamiento termoquímico de las aleaciones ferrosas, para describir la cinética de formación y la estructura de la capa difusiva no se pueden utilizar los diagramas binarios de fases. Para las aleaciones de dos componentes la secuencia de formación de fases y su composición en la primera aproximación (sin tener en consideración la redistribución por difusión de los elementos de aleación, que se produce durante el tratamiento termoquímico) se pueden observar en el diagrama de equilibrio de fases o en sus cortes isotérmicos a la temperatura de saturación. Durante la saturación de las aleaciones ferrosas con carbono la difusión de este último transcurre a una velocidad que supera considerablemente la velocidad de difusión de los elementos de aleación de la composición inicial y cuya difusión influye en la cinética de formación de la capa difusiva y en la composición de las fases que se forman [1].

La zona austenita-carburo de hierro surge, prácticamente, en la capa cementada sólo al alear el acero con elementos formadores de carburos, en primer lugar, con cromo, los carburos empiezan a formar en la superficie en los límites de los granos. Con el tiempo los carburos se precipitan también dentro del grano, la región bifásica se propaga a cierta profundidad y en la superficie, durante la cementación de los aceros de alta aleación, se puede formar una capa continua de carburos [1].

Los carburos en exceso tienen forma globular. Al alear el acero con V (1 - 4%) o Ti (0.2 - 2.0%), surgen los carburos de vanadio (VC) y carburos de titanio (TiC) puntuales o aciculares y una red cementítica. El manganeso no produce carburos granulares. En la superficie se forma una capa de cementita que se convierte en red. Durante la formación de la zona de austenita y carburo, la concentración media del carbono en la superficie de la capa cementada supera considerablemente el límite de solubilidad de éste en la austenita $C_{m\acute{a}x}$. La formación de carburos hace que la austenita se empobrezca de los elementos aleantes. Dentro de los límites de la zona austenita-carburo la concentración de los elementos aleantes en la austenita crece desde la superficie hasta el interior, por

lo tanto, la alta concentración de carbono en la capa produce que la templabilidad disminuya. Esto se debe a la acción que el carburo ejerce sobre la desintegración de la austenita y a la reducción de su estabilidad a costa de la transición de los elementos aleantes al carbono [1].

La movilidad difusiva del carbono en el hierro γ es considerablemente menor que en el hierro α . Según Blánter la dependencia entre el coeficiente eficaz de difusión D_C^γ (m^2/s) del carbono en la austenita, se determina por la Ec. 1.1.

$$D_C^\gamma = (0.04 + 0.08\%C) \exp\left(\frac{131}{RT}\right) 10^{-4} \quad (1.1)$$

donde: R es la constante de los gases ideales, la cual toma un valor de $8.314 \frac{J}{mol \cdot K}$

Por otro lado, según los datos obtenidos experimentalmente por Wells y Mell, la movilidad difusiva del carbono en la austenita se determina con la Ec. 1.2:

$$D_C^\gamma = (0.07 + 0.06\%C) \exp\left(\frac{134}{RT}\right) 10^{-4}, R = 8.314 \frac{J}{mol \cdot K} \quad (1.2)$$

Los resultados de la medición del coeficiente eficaz de difusión del carbono en la austenita, así para diferentes concentraciones de carbono se presentan en la Fig. 1.9. La movilidad difusiva del carbono depende de la composición de la austenita. La aleación del acero permite aumentar o disminuir el coeficiente de difusión [1].

Los otros elementos formadores de carburos (Si, W, Cr entre otros elementos) aumentan la energía de activación Q (ver Fig. 1.10a) y el factor D_0 , disminuyen el coeficiente eficaz de difusión D_C^γ (ver Fig. 1.10b). La energía de activación crece tanto más, cuanto mayor es la fuerza de enlace entre el elemento y el carbono, y cuantos menos elementos de aleación deforman la red de austenita [1].

La aleación del acero con elementos no formadores de carburos Ni y Co incrementa el coeficiente efectivo de difusión del carbono en la austenita y disminuye la energía de activación (ver Fig. 1.10a), siendo pequeña la variación de D_0 . El silicio a

temperaturas relativamente bajas (inferiores a los 1,050 °C) acelera la difusión del carbono, aumentando el coeficiente eficaz de difusión [1].

La fuerza de enlace de los elementos que no forman carburos es mayor con el hierro que con el carbono, por este motivo su difusión es mayor. Por otra parte, estos elementos no formadores de carburos deforman la red cristalina de la austenita, elevan su energía libre y también acortan el período de vida de los átomos de carbono atómico. Los elementos no formadores de carburos aceleran la difusión del carbono en el hierro, en la medida que deforman la red de austenita [1].

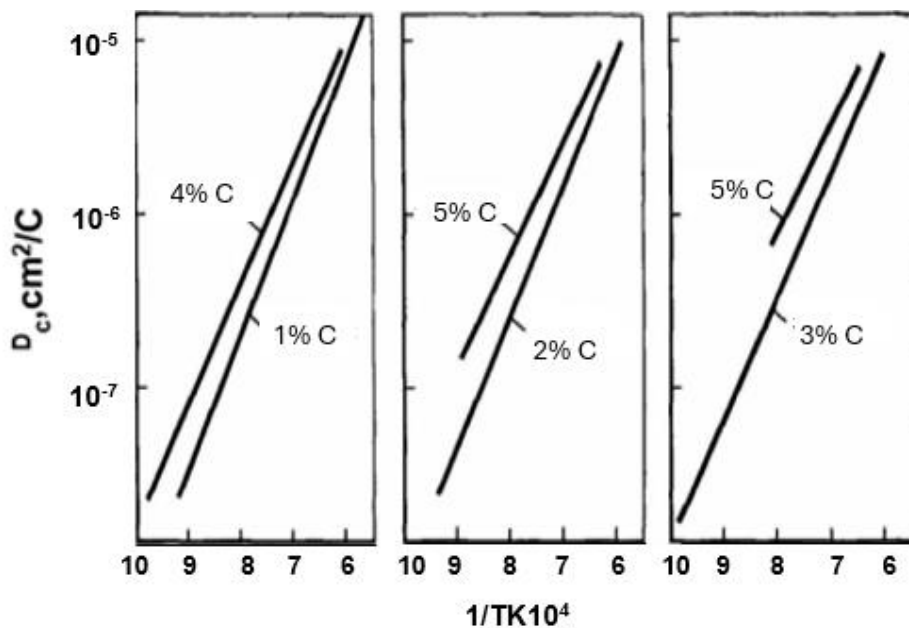


Fig. 1.9. Dependencia de $D = f/T$ para la difusión de carbono [1].

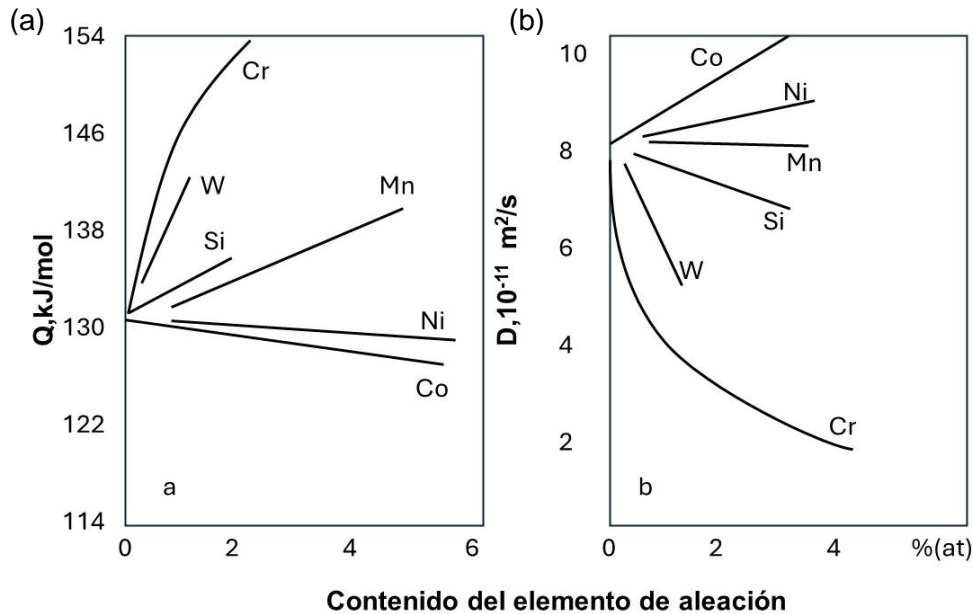


Fig. 1.10. Influencia de los elementos de aleación en: a) La energía de activación (Q); y b) en el coeficiente de difusión del carbono en la austenita a 1,100 °C [1].

Los elementos aleantes no influyen de igual modo en el coeficiente eficaz de difusión y en la concentración del carbono en la capa superficial. Por eso, su influencia en el espesor de la capa depende de cuál de estos dos factores es predominante. El cromo y el wolframio hacen que se reduzca D_C^Y , aunque elevan la concentración del carbono en la superficie C_{up} [1].

El níquel, contrario al cromo y el wolframio, hace que D_C^Y aumente; aunque disminuye la concentración de carbono en la superficie y por lo tanto se reduce el espesor de la capa cementada. Sin embargo, aquellos elementos aleantes que están en los aceros al carbono para cementación, influyen poco en el espesor de dicha capa [1].

Las propiedades de la capa cementada dependen en gran medida de la curva de distribución del carbono en el espesor de la capa (ver Fig. 1.11). La curva de distribución del carbono en el espesor de la capa, se suele caracterizar por la concentración del carbono en la superficie (C_{sup}), por la disminución del contenido del carbono $\Delta C_1 = C_{sup} - C_{(x_{ef}/3)}$ a una distancia igual a 1/3 del grosor eficaz de la capa ($x_{ef}/3$) y por la presencia de una zona descarburada en la superficie de la pieza, en función de las condiciones de funcionamiento, del material y dimensiones de las piezas de máquina se asignan los valores determinados de C_{sup} , ΔC_1 y x_{ef} para garantizar la óptima resistencia constructiva [1].

En la mayoría de los casos para obtener una alta resistencia al desgaste, a la rotura frágil y al comportamiento a la fatiga. La concentración de carbono en la capa superficial tiene que estar dentro del intervalo de 0.8 a 1.0%. Para incrementar la resistencia a la fatiga por contacto, el contenido de carbono puede ser aumentando hasta un intervalo de 1.0 a 1.1% C. Concentraciones más altas a 1.1 % de C en la superficie se obtiene una disminución de las propiedades mecánicas. La resistencia a la flexión estática se reduce cuando el contenido de carbono es mayor a 0.6%. Con un contenido de 1.0% de C, el σ_{flex} se reduce en un 10 a 15% y con un contenido de 1.4% de C se reduce de 4 a 3 veces. El valor máximo de esfuerzo corresponde a un intervalo de 0.8% a 1.0% de C; al seguir el aumento del carbono en la capa, este esfuerzo se reduce de 1.8 a 1.3 veces [1].

Para asegurar el sobre espesor dado para el rectificado, sin una pérdida de dureza considerable y las altas características mecánicas, el gradiente de carbono en el espesor de capa cementada no debe ser brusco, sobre todo en la región adyacente a la superficie de saturación. El espesor de la capa cuyo contenido de carbono disminuye de modo significativo (tramo horizontal), se determina por el descenso de la concentración de carbono ΔC_1 en $x_{ef}/3$ y debe satisfacer la desigualdad $\Delta C_1 \leq (\alpha/100) \cdot C_{sup}$ (ver Fig. 1.11) [1].

El descenso admisible de la concentración de carbono en el espesor de la capa α depende del carácter de funcionamiento de la pieza y está dentro de los límites α es igual a 5 a 10%. Por ejemplo, para las fresas de múltiples discos de los trépanos de sondeo se hace que α es igual a 10%, mientras que, para las patillas de trépanos, hasta el 5.0%; es decir, en este último caso según las condiciones de desgaste se requiere un tramo menos pronunciado [1].

La descarburización superficial (descenso de la concentración del carbono) empeora las características mecánicas y no es admisible. Para obtener la curva requerida de distribución de carbono en el espesor de la capa $C(x)$ es necesario elegir correctamente y mantener con suficiente exactitud los parámetros tecnológicos principales del proceso de cementación (temperatura, tiempo de saturación, actividad del ambiente, etc [1].

Cualquiera que sea el proceso que se emplee, no conviene en general que el contenido de carbono la capa cementada pase de 1% y se debe procurar que la parte periférica de la pieza, después de rectificada, quede aproximadamente con 0.80 a 0.90% de carbono, con lo que se obtienen en el temple durezas de 62 a 65 Rockwell-C, que es aproximadamente el límite de dureza por el cual la lima ya no marca el acero [1].

Cuando el contenido en carbono de la zona periférica es superior a la composición eutectoide de 0.90% de carbono, suelen aparecer redes de cementita o de carburos muy marcadas, que pueden volver frágil la capa cementada y con tendencia a descascararse. En estos casos conviene dar a las piezas después de la cementación un recocido de difusión a 800 °C en un medio apropiado para disminuir el porcentaje de carbono de la periferia. Con este tratamiento se uniformiza bastante el contenido de carbono en la capa periférica y se evitan posibles fracturas en las piezas cementadas [1].

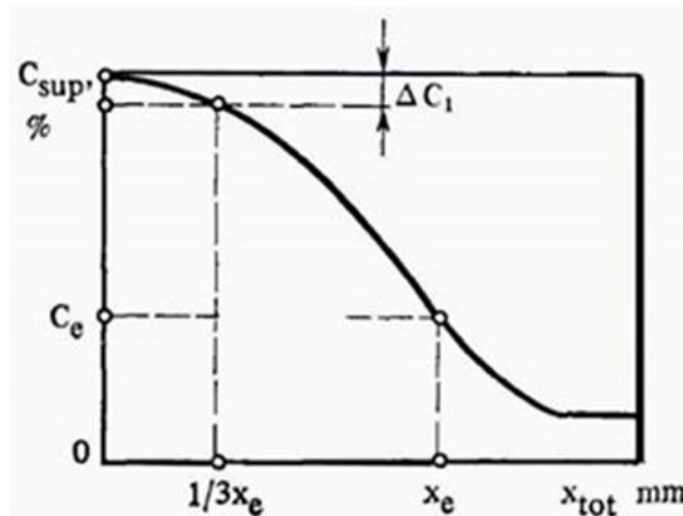


Fig. 1.11. Distribución de carbono en el espesor de la capa cementada [1].

B) Características mecánicas de la capa cementada

Las características mecánicas de la capa cementada son casi siempre independientes de las del núcleo. Generalmente interesa que la dureza superficial sea superior a 60 Rockwell-C, aunque para algunas piezas que sufren poco rozamiento, son suficientes durezas comprendidas entre 52 y 60 Rockwell-C. Se consideran durezas muy buenas las mayores de 63 Rockwell-C; buenas las comprendidas entre 62 y 63 Rockwell-C y aceptables entre 60 y 62 Rockwell-C [3].

En piezas pequeñas estas durezas se consiguen lo mismo con aceros al carbono (templados en agua) que con los aceros aleados (templados en aceite), siendo ventajosa la utilización de estos últimos, porque al templar en aceite disminuyen las deformaciones y se obtiene una gran uniformidad en los resultados [3].

Con los aceros aleados con cromo y molibdeno, se obtienen durezas ligeramente superiores a las que se consiguen con otros aceros y mayor resistencia al desgaste, debido a la formación de carburos complejos en la zona periférica. Para comprobar la dureza de la capa cementada, además de las máquinas de dureza Rockwell-C y Vickers, es muy útil el uso de la lima, que, empleada con precaución y cuidado, rinde muy buenos resultados [3].

Utilizando una lima fina y nueva, se pueden distinguir las piezas que tienen una dureza inferior a 60 Rockwell, que son rayadas con la lima, y las de mayor dureza que no son rayadas. Empleando este procedimiento, se puede controlar rápida y eficazmente la marcha de la fabricación de piezas que, por su forma complicada, no pueden ser ensayadas con las máquinas de dureza. En algunas ocasiones, generalmente no muy frecuentes, no se llega a alcanzar en el temple de la pieza cementadas la dureza adecuada, debido a que en el calentamiento realizado para templar las piezas se descarbura la capa periférica y entonces la zona superficial queda con dureza baja (ver Fig. 1.12) [3].

También, suele ocurrir a veces en los aceros de alta aleación al cromo-níquel o al cromo-níquel-molibdeno que después del temple de las piezas cementadas se obtienen durezas relativamente bajas de 60 a 61 Rockwell-C, inferiores a las que normalmente interesa obtener (62 a 65 Rockwell- C) e inferiores también a las que suelen obtener sin dificultad cuando esas piezas se fabrican con aceros de cementación al carbono o de baja aleación.

Esta baja dureza suele ser debida a la presencia de austenita retenida en la capa cementada como consecuencia del empleo de temperaturas de temple demasiado elevadas (ver Figs. 1.13 - 1.14).



Fig. 1.12. Capa exterior descarburada (color blanco) de una pieza que se ha cementado, 100x [3].



Fig. 1.13. Capa periférica de una pieza cementada y templada de un acero Cromo-Níquel, 200x [3].



Fig. 1.14. Agujas de martensita sobre un fondo de austenita retenida, correspondiente a la zona periférica, 1,000x [3].

C) Medición del espesor de la capa cementada efectiva

Para conocer en los procesos de cementación, la penetración del carbono, se pueden emplear varios procedimientos. Así, el más sencillo consiste en cementar junto con las piezas, dos o tres varillas, del mismo material de 6 a 12 mm de diámetro. Después de cementadas se templan a 800 °C en agua y se rompen, permitiendo observar en la fractura una capa periférica dura, que presenta un grano mucho más fino que el núcleo

central y que señala con bastante aproximación la penetración del carbono. Al mismo tiempo se puede conocer si ha crecido o no el grano del núcleo central durante la cementación [3].

Otro método consiste en cortar las varillas después de cementadas, pulir las secciones transversales y atacarlas durante 30 s con ácidos nítricos al 5%. Las zonas cementadas se ennegrecen y se puede medir con más precisión que en el caso anterior el espesor de esas zonas, que tienen un contenido en carbono superior a 0.50% [3].

El examen microscópico sirve para estudiar en detalle el avance de la cementación. Un procedimiento muy empleado, consiste en cortar los discos cementados, después de la cementación y antes del temple final, rectificando y puliendo la sección transversal. Se ataca con Nital-5 y se mide el espesor del anillo periférico de color negro, que corresponde a la capa cementada, con un microscopio de retícula graduada, empleando 10 a 50 aumentos. Las estructuras recocidas de los aceros cementados, que son de tipo perlíticas, son las que dan mejor idea del proceso y son también las más claras y fáciles de observar [3].

Para estudiar el avance de la cementación, basta generalmente con pocos aumentos (es suficiente con 10 a 100 aumentos). El análisis químico da también una idea muy exacta de la operación. Para realizarlo, conviene utilizar cilindros fabricados con el acero que se quiere estudiar de 15 a 20 mm de diámetro y 100 a 200 mm de longitud, que después de cementados con el resto de las piezas, son torneados con pasadas de profundidad de corte de 1/10 mm [3].

Recogiendo y analizando la viruta de cada uno de los escalones, se conoce perfectamente la distribución del carbono en el acero. A continuación, se presenta un método para determinar a profundidad de la capa cementada. Este ensayo se hace cementando y templando una varilla cilíndrica de 100 mm de longitud y de 10 a 30 mm de diámetro, de la misma clase de acero con que se han fabricado las piezas, a la que se le hace un rectificado ligeramente cónico, de forma que en uno de los extremos se conserve el diámetro inicial, y en el otro desaparezca completamente la capa cementada [3].

Se hacen durezas a lo largo de toda la generatriz, y se anotan los resultados. Se observará que la dureza varía de un extremo a otro, existiendo una zona de máxima

dureza, en la que los resultados son casi constantes. El espesor de esa zona señala la profundidad de la capa cementada. Los resultados que se obtienen al realizar el ensayo en la forma señalada varían según sean las máquinas de dureza empleadas. Si se emplea máquina Vickers el espesor que se obtiene para la capa, con dureza superior a 700 Vickers, por ejemplo, será mayor cuanto menor sea la carga empleada. Esto es debido a que al emplear altas cargas la punta del diamante llega hasta la zona blanda, no así cuando se emplean cargas bajas [3].

Para piezas cementadas destinadas a la fabricación de automóviles y máquinas ligeras, es muy utilizada la dureza Rockwell-C y se consideran aceptables los espesores que con la carga de 150 kg dan cifras Rockwell-C superiores a 62. Otro método para determinar el espesor de la capa dura es mediante el microscopio. Para ello se cortan transversalmente las piezas y se hacen mediciones de microdureza (ver Figs. 1.15 y 1.16) [3].



Fig. 1.15. Ensayo de microdureza Vickers en la sección transversal de un acero cementado y templado, 100x [3].

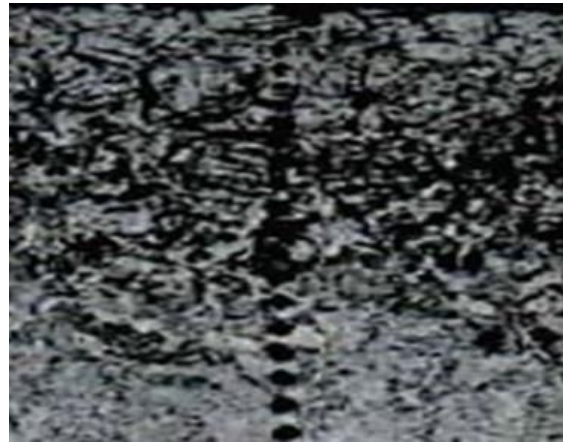


Fig. 1.16. Ensayo de microdureza Vickers en la sección transversal de un acero cementado y templado, 500x [3].

1.1.6. TRATAMIENTOS TÉRMICOS POSTERIORES

Los aceros se carburizan en la región de austenita, así el temple directo desde la temperatura de carburización endurecerá sólo la parte externa si la rapidez de enfriamiento es mayor que la rapidez crítica de enfriamiento [3].

El temple directo de los aceros de grano grueso suele dar lugar a fragilidad y distorsión, de manera que este tratamiento sólo se debe aplicar a aceros de grano fino. Los aceros aleados rara vez se utilizan en condición sólo de temple sin tratamiento térmico de revenido, debido a la gran cantidad de austenita retenida en la parte superficial endurecida. En la Fig. 1.17 se presenta varios tratamientos térmicos posteriores a la cementación para diferentes aceros de bajo carbono [3].

Cuando una pieza carburizada se endurece, la parte exterior aparecerá como una zona de martensita clara, seguida por una zona más oscura de transición. La parte exterior dura o efectiva se mide desde la orilla exterior hasta la media de la zona oscura. De la naturaleza del gradiente del carbono, la parte superficial dura contiene la porción de la parte superficial superior al 0.40% de carbono y es aproximadamente igual a dos terceras partes de la superficie endurecida total [3].

Las piezas cementadas se pueden temprar directamente desde la temperatura de cementación. Aunque esto sólo es posible generalmente en el caso de piezas sometidas a esfuerzos no excesivos o piezas pequeñas, pues el grano del acero se vuelve demasiado grueso y la superficie contiene cementita libre [3].

En la carburización gaseosa, se puede evitar esto último. En los aceros aleados para cementación que contienen formadores de carburos, por ejemplo, el cromo como elemento de aleación, se puede llegar a la formación de carburos especiales y, por consiguiente, a una considerable concentración de carbono en la zona superficial [3].

En el caso de carburos aleados sólo es posible llevar a cabo un recocido de difusión, puesto que los carburos tienen muy poca capacidad de disolución y el carbono verdaderamente disuelto hace que subsista la sobresaturación de la zona superficial, y por consiguiente la nueva formación de carburos de aleación, si no se tiene tiempo para una difusión más intensa [3].

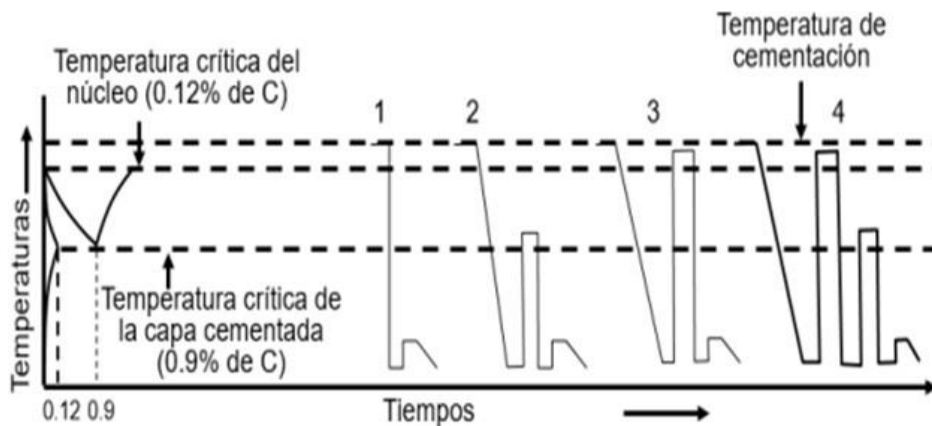


Fig. 1.17. Tratamientos posteriores a la cementación [3].

Con el enfriamiento al aire, la cementita en los aceros no aleados volverá a precipitar en forma de red en los límites intergranulares. En estos aceros, no obstante, se puede evitar esta formación reticular mediante un enfriamiento rápido, por ejemplo, en aceite. Esto, sólo se puede realizar si es admisible la mayor deformación originada por el enfriamiento rápido, o si las piezas, debido a su forma, son insensibles a la deformación. Muchas veces se suele calentar no muy por encima de la línea E-S, llegando por tanto sólo por encima de la línea de transformación del núcleo, pobre en carbono [3].

En los aceros corrientes de cementación, con aproximadamente 0.1% de carbono, esto suele ser aproximadamente 900 °C. A esta temperatura se disuelve una gran parte de cementita intergranular (en contenidos no muy altos de carbono superficial, toda la cementita) y el resto se reúne en forma globular por tensión superficial. El enfriamiento rápido que se hace inmediatamente después actúa al mismo tiempo afinando también el grano del núcleo. En el recocido de difusión se tiene que cuidar que éste se haga en atmósfera neutra, al abrigo del aire, porque de lo contrario se descarbura la zona superficial [3]:

A) Temple

Los distintos procesos de temple empleados después de la cementación, así como la cementación propiamente dicha, están representados en diagramas temperatura-tiempo en la Fig. 1.18, los cuales son [3]:

- ✓ Temple directo desde la temperatura de cementación,

- ✓ Temple después de un enfriamiento lento,
- ✓ Temple con recocido intermedio,
- ✓ Doble temple, y
- ✓ Temple directo desde la temperatura de cementación.

El temple rápido se hace en agua (c) desde la temperatura de cementación, o en aceite si se trata de aceros aleados. Como agente de temple se emplean soluciones salinas y emulsiones. Algunas veces también se enfría el acero en baños calientes entre 200 - 250 °C (e) [3].

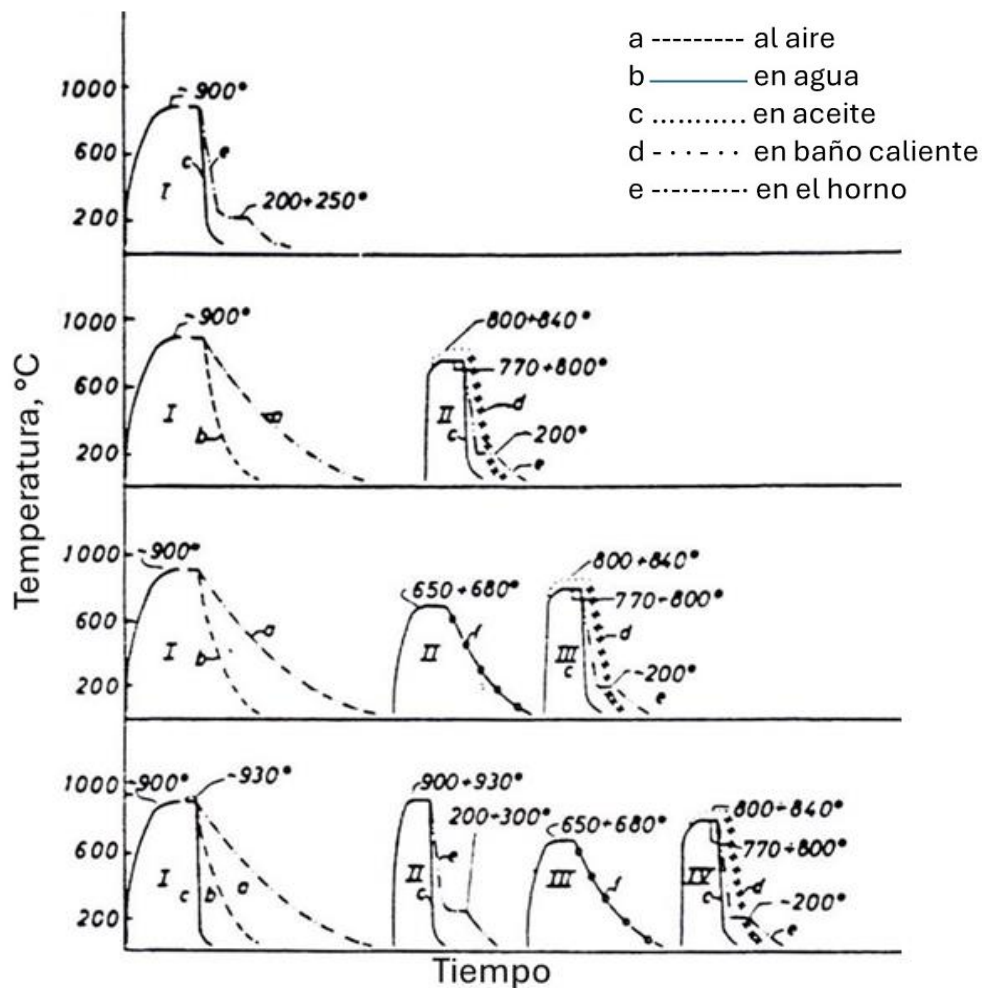


Fig. 1.18. Distintos tratamientos térmicos en la cementación de los aceros. Esquema de la variación de temperatura-tiempo [3].

Esta clase de temple se puede aplicar a aceros sometidos a pocos esfuerzos o también cuando se tiene que cementar aceros que son insensibles a altas temperaturas

en lo que respecta a la formación de granos gruesos. Este proceso de temple suele emplearse, además, para piezas fabricadas en forma masiva con poca profundidad de cementación y también está perfectamente indicado para temple después de la cementación en baños de cianuros o después de la cementación gaseosa [3]:

✓ Temple después de un enfriamiento lento

a) Las piezas se enfrían despacio en la caja (1a).

Por esto las tensiones que existen en la pieza antes del propio temple son pequeños. Sin embargo, la estructura del núcleo del material resultará relativamente basta, puesto que la ferrita tiene tiempo suficiente para depositarse en los límites intergranulares primarios y formar así una red gruesa. Después del enfriamiento lento se vuelve a calentar el acero para su temple (2). Al contrario que en el temple directo, se aplica, no obstante, sólo una temperatura de temple que corresponde a la correcta temperatura para la zona superficial rica en carbono, o sea, más o menos la temperatura de temple de aceros eutectoides [3].

El enfriamiento se hace en agua (2c) o aceite (2d) y líquidos parecidos o en baños calientes a aproximadamente 200 °C (2e). b) En el enfriamiento lento desde los baños de sales, y también con retirada del material del horno de cementación gaseosa, se utilizará aire en reposo (1b) como agente de enfriamiento [3].

Este se hace entonces de manera que responda a un enfriamiento de normalizado. En este caso, sobre todo en secciones no demasiado gruesas, se obtendrá en el núcleo una estructura secundaria mucho más fina que con el enfriamiento en cajas. Las características tecnológicas en el núcleo serán mejores [3].

El temple siguiente se efectúa con arreglo al numeral 2). Esta clase de temple (2a y 2b) da por resultado una deformación menor, junto a una alta dureza superficial, la cual es en este caso con frecuencia mayor que en el temple directo, pues debido a la temperatura más elevada en el temple directo se da fácilmente mayor cantidad de austenita residual junta a la martensita.

✓ Temple con recocido intermedio

El temple se hace igual que en 2a y 2b, sólo que entre el enfriamiento desde la temperatura de cementación y el calentamiento hasta la temperatura de temple se intercala un recocido por debajo de A_{c1} con enfriamiento en horno (f). Con este recocido

intermedio se consigue una reducción de tensiones, y en parte una conformación de la cementita, tanto de la cementita intergranular como la cementita laminar de la perlita [3].

Esto tiene particular importancia cuando después de la carburización se tiene que realizar un maquinado de la pieza [3].

✓ Doble temple

El temple se hace en forma de enfriamiento rápido repetido durante dos veces. El primer temple, que se hace desde una temperatura por encima de A_{r3} del material del núcleo, se realiza a partir de la cementación o después de un nuevo calentamiento. En este último caso el enfriamiento precedente a partir de la cementación se hace de modo análogo al numeral 2), lentamente, enfriamiento en cajas 1a) o en el aire 1b) [3].

En el temple directo desde la cementación, la temperatura de ésta, si es inferior a la de temple del núcleo, se tiene que aumentar hasta llegar a dicha temperatura de temple. Este primer temple es aplicado al núcleo y da por resultado una estructura muy fina en este último e impide que aparezca cementita intergranular (1c) o la elimina por completo. Si sólo se tiene que templar directamente desde la temperatura de cementación el grano tiene que resultar algo más grueso, dado que aquí llega a desaparecer el afino de la estructura del núcleo, que de ordinario se produce por el enfriamiento y luego calentamiento [3].

El enfriamiento desde altas temperaturas da lugar casi siempre a tensiones considerables que no obstante se puede reducir por temple isotérmico cuando se trata de secciones pequeñas. Después del enfriamiento hasta temperatura ambiente (2c) es conveniente intercalar un recocido por debajo de Ac_1 . Esto permite después del recocido intermedio se lleva a cabo el temple de la zona superficial, es decir; desde temperatura Ac_1 . También en este caso se hace muchas veces el enfriamiento rápido en baños de sales con el fin de disminuir las tensiones [3].

El calentamiento hasta la temperatura de temple de la superficie significa para el núcleo un revenido algo excesivo. Siempre que el núcleo sea pobre en carbono, como sucede en la mayoría de los aceros de cementación, generalmente sólo se disuelve entonces el escaso contenido de perlita y algo de ferrita, el tamaño del grano se conserva más o menos invariable. A pesar de esto, es conveniente que el tiempo de permanencia durante el calentamiento sea breve [3].

Cuando el núcleo tiene gran tenacidad, el tratamiento de doble temple produce un grano más fino en la capa superficial y, por consiguiente, la óptima tenacidad en la zona templada, la cual mejora al evitar la aparición de cementita intergranular. Un doble temple por el que se logra una estructura francamente fina en el núcleo y también en la capa superficial, descartando tensiones demasiado altas originadas por enfriamiento, consiste en enfriar rápidamente desde el baño de sales en un baño caliente seguido de otro calentamiento y temple a la temperatura adecuada para la capa rica en carbono de la pieza [3].

B) Revenido

En la condición martensítica sin tratamiento térmico ulterior, el acero es demasiado frágil para la mayoría de las aplicaciones. La formación de martensita origina grandes tensiones residuales en el acero; por lo tanto, el endurecimiento casi siempre sigue de un tratamiento de revenido, el cual consiste en calentar el acero a alguna temperatura menor que la inferior crítica ($723\text{ }^{\circ}\text{C}$) [4].

El propósito del revenido es liberar los esfuerzos residuales y mejorar la ductilidad y tenacidad del acero. Este aumento de ductilidad generalmente se obtiene a costa de la dureza o de la resistencia [4].

En general, sobre el amplio intervalo de temperatura de revenido, la dureza disminuye y la tenacidad aumenta conforme se incrementa la temperatura de revenido.

La variación de dureza y tenacidad con la temperatura de revenido mostrada en la Fig. 1.19 es típica de aceros al carbono y aceros de baja aleación [4].

El revenido dentro del intervalo de temperaturas de 95 a $205\text{ }^{\circ}\text{C}$ se emplea solamente en aquellos casos en los que es importante conservar tanta la dureza como también la resistencia mecánica como sea posible, de modo que esto se logra empleando el revenido para conseguir el pequeño aumento de tenacidad posible, manteniendo la alta dureza especificada [2].

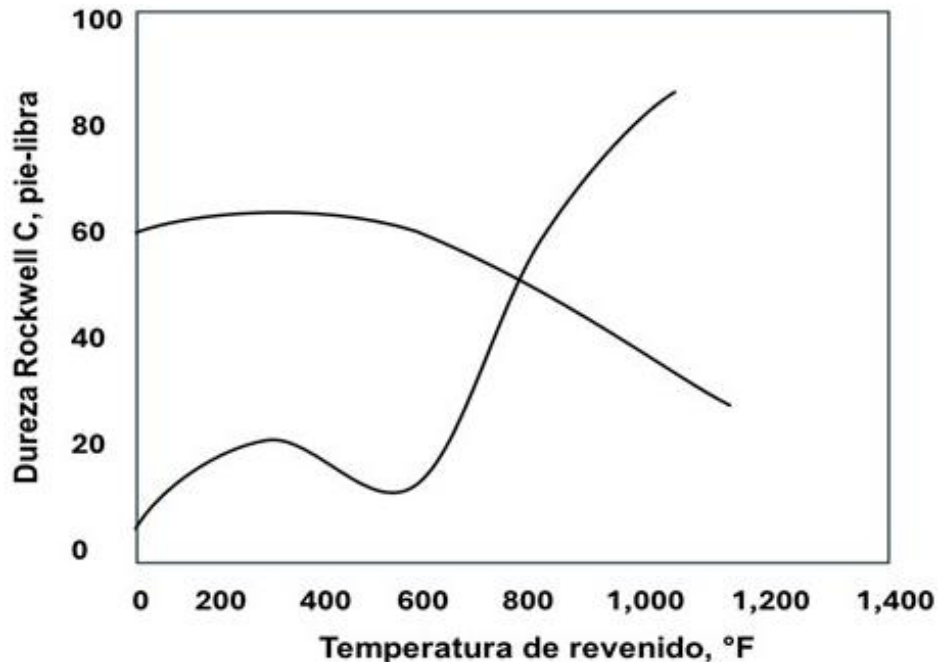


Fig. 1.19. Dureza y tenacidad de un acero 4140 después de revenido durante una h a diferentes temperaturas [4].

En lo que respecta a la estructura del acero, se sabe que ocurren dos cambios en este intervalo de temperaturas de revenido [2]:

- ✓ La martensita tetragonal se transforma en cúbica (ver Fig. 1.20);
- ✓ Se precipita carbono en una forma distinta que la cementita, Fe_3C , y generalmente descrita como un precipitado de transición, posiblemente Fe_2C o Fe_2C_4 conocido generalmente como carburo épsilon.

Con un revenido a temperatura más elevada disminuye la dureza y después de un revenido a 250 °C, se encuentra una dureza que es generalmente unos cuatro puntos inferiores a la del acero templado (sin revenido). La tenacidad, a temperatura ambiente, de la mayoría de los aceros templados aumenta progresivamente conforme se aumenta la temperatura de revenido desde la temperatura ambiente hasta el intervalo de 205 a 230 °C [2].

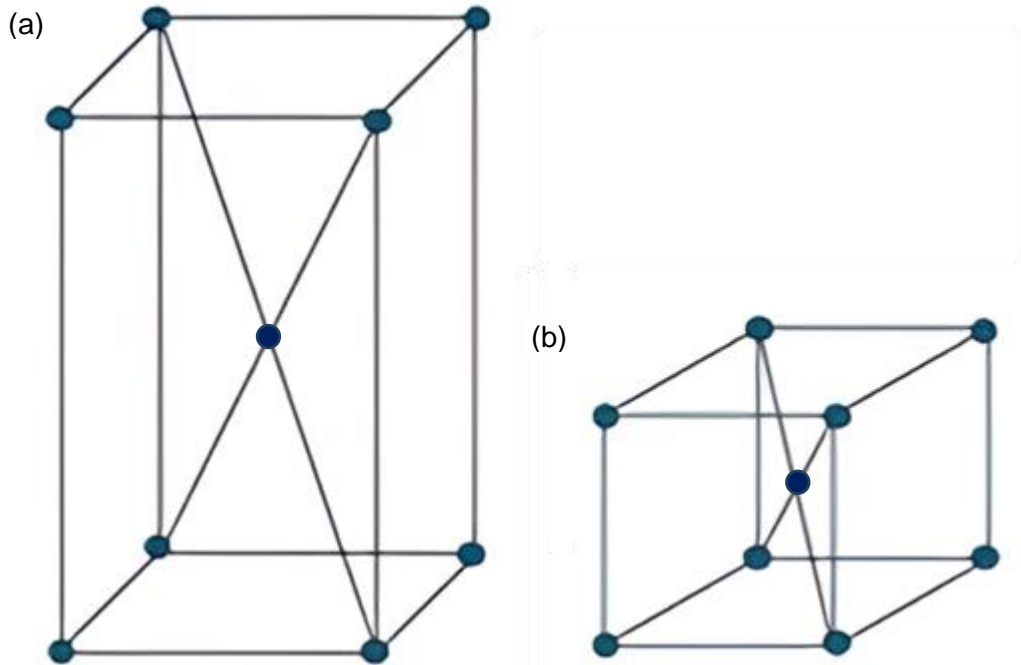


Fig. 1.20. Disposición de los átomos en las redes cristalinas: a) Estructura tetragonal centrada en el cuerpo; y b) estructura cúbica centrada en el cuerpo [2].

1.2. DESGASTE

El movimiento de una superficie sólida sobre otra es fundamentalmente importante para el funcionamiento de muchos tipos de mecanismos, tanto artificiales como naturales. Los sistemas mecánicos en los cuales las superficies no deslizan o giran sobre otras, son muy inusuales, de tal manera que la tribología se vuelve muy importante, siendo esta la ciencia que estudia el desgaste y la cual permite que se desarrollen estudios de desgaste en un amplio número de aplicaciones. El avance en la comprensión de las interacciones entre superficies ha demandado habilidades de ingenieros mecánicos, científicos de materiales, físicos y químicos; en el contexto de la bio-tribología la cual concierne con los organismos vivos, la disciplina se vuelve más amplia e incluye ciencias médicas y biológicas [4].

La fricción juega un papel importante en el estudio de desgaste, en algunos casos baja fricción es deseable y esencial para el correcto funcionamiento de los sistemas mecánicos, por ejemplo, en bisagras de puertas, en articulaciones de caderas en el

ámbito humano, demandan bajas fuerzas de fricción. El trabajo hecho, por ejemplo, en vencer la fricción en rodamientos y engranajes en máquinas, es disipado como calor, y reduciendo la fricción se puede alcanzar un aumento en general en la eficiencia, la baja fricción no es necesariamente beneficiosa en todos los casos, en frenos y embragues, un adecuado control de la fricción es esencial para disipar la energía cinética y transferir el torque. Una alta fricción es deseable entre la llanta de un vehículo y la superficie de la calle, de la misma manera, que el zapato de un pie en contacto con el camino. De una u otra forma siempre que una superficie este en contacto con otra ocurrirá ya sea daño o desgaste a una o ambas, generalmente convirtiéndose esto a largo plazo en pérdida progresiva de material. A veces el desgaste es imperceptible, a la misma vez se podría dar el caso donde haya desgaste prematuro, es decir un desgaste rápido, en la mayoría de situaciones el desgaste es perjudicial, además de causar tolerancias incrementadas entre los componentes en movimiento, este movimiento libre indeseado de mecanismos conlleva a pérdidas de precisión, incluso en ciertos casos a vibración, incrementando la carga mecánica, el desgaste prematuro y la fatiga. La pérdida de masa por desgaste, relativamente en pequeñas cantidades puede ser suficiente para causar fallas completas en máquinas complejas y de gran tamaño [4].

En algunas aplicaciones tales como cojinetes, el desgaste es la principal preocupación, mientras que para otros como el comportamiento tribológico del sistema es importante, no es el criterio principal para su diseño. En ingeniería moderna, se encuentra un incremento en el uso de materiales con combinaciones más atractivas de densidad y propiedades mecánicas que el acero, o con beneficios en costo, rendimiento y maleabilidad, tales como polímeros, cerámicos y otros materiales compuestos, además se observa también un rápido incremento en el uso de ingeniería de superficie para proveer combinaciones con mejor relación costo-efectividad de rendimiento de la superficie con mejores propiedades; El origen de estos desafíos surgen de las condiciones en las que la superficie es expuesta durante el desgaste [5].

La dificultad involucrada en describir totalmente y después formular modelos para el comportamiento del desgaste de superficies, no está solamente asociada con condiciones locales, el problema es mucho más complejo, se sugieren al menos 3 razones, la primera es que el proceso de desgaste cambia por sí solo la composición y

las propiedades de la superficie más próxima a las regiones de desgaste; el material que separa 2 superficies interactuando puede ser tratado como un tercer componente, con su propio historial de evolución de propiedades y estas podrían exhibir cambio en el tiempo de vida del sistema, la segunda es la remoción o desplazamiento de material durante el desgaste conlleva a cambios en la topografía de la superficie, y tercera, los mecanismos donde ocurre el desgaste son usualmente complejos y pueden incluir una mezcla de procesamientos mecánicos y químicos, por ejemplo, en la superficie sin lubricación de dos superficies de acero, parte de estos metales se puede perder por razones mecánicas después de la oxidación, mientras que en condiciones de lubricación, la fuente del desgaste es, a veces, la ausencia de elementos aditivos en los lubricantes. A pesar de la falta de modelos de representación del desgaste, se han conseguido progresos en la comprensión de la manera en que ocurre el desgaste en los mecanismos [5].

1.2.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

La palabra tribología está formada por los términos procedentes del griego, tribo-, cuyo significado es “frote o rozamiento” y -logia que significa “estudio, tratado o ciencia”, por lo que la definición literal de la palabra tribología es “ciencia del rozamiento”. El concepto de tribología fue enunciado por primera vez en 1966 por el Profesor H. Peter Jost en un informe del Departamento de Educación y Ciencia del Reino Unido [6].

En éste se definía la tribología como “ciencia y tecnología de superficies en movimiento relativo interactuando entre sí y de los temas y prácticas relacionados”. Según la definición dada por el Profesor H. Peter Jost, el concepto de tribología abarca tanto la fricción como el desgaste y la lubricación, por lo que se revela como una ciencia interdisciplinar que engloba partes de otras muchas materias, entre las que se encuentran la física, química, mecánica de fluidos, ciencia y resistencia de materiales [7].

La Real Academia Española introdujo el término en el diccionario de la lengua española, definiéndolo como “técnica que estudia el rozamiento entre los cuerpos sólidos, con el fin de producir mejor deslizamiento y menor desgaste de ellos”. Aunque el término tribología es relativamente reciente, no ocurre lo mismo con los temas de estudio a los

que hace referencia. El interés por la fricción y sus consecuencias se remonta al inicio de la historia. En este capítulo se hará un resumen de los principales estudios y avances relacionados con el campo tribológico, dividiendo la historia en una serie de periodos [7]:

A) El Renacimiento. Leonardo da Vinci:

Antes del Renacimiento los datos que se conocen con respecto a la tribología se obtuvieron en función de los descubrimientos y aportaciones que existen dentro del campo de la arqueología. Durante el periodo comprendido entre 1450 y 1600, correspondiente al Renacimiento, es cuando se comienza a escribir sobre el tema, siendo los primeros testimonios escritos de esta época. La contribución más destacable en este periodo en el campo de la tribología se debe a Leonardo da Vinci, quién, además de su trabajo como artista, realizó una importante labor en el campo científico. A pesar de su destacado trabajo en este campo, sus descubrimientos no fueron conocidos hasta varios siglos después, puesto que durante mucho tiempo su trabajo permaneció perdido. La mayor parte del trabajo de Leonardo da Vinci en el tema de la tribología se encuentra recogido en el “Codex Atlanticus”, que se publicó a finales del siglo XIX, y en los manuscritos encontrados en Madrid en 1967 (“Codex Madrid I y II”). En la Fig. 1.21. se presenta una reproducción del “Codex Atlanticus” y del “Codex Arendel”, donde se demuestra que Leonardo da Vinci midió las fuerzas de fricción entre dos superficies, así como la influencia del área de contacto aparente en esas fuerzas (ver Fig. 1.21a y b). Además, en la Fig. 1.21c y d, se aprecia cómo se dispone un peso en una polea para observar la fricción de un cuerpo sobre una superficie horizontal y la existente en el caso de un rodillo y medio cojinete [8].

Las afirmaciones de Leonardo Da Vinci sobre estos fenómenos concuerdan con las dos primeras leyes de la fricción enunciadas posteriormente por Amontons en el año 1699:

- 1) La fricción hecha por el mismo peso resultará en la misma resistencia al inicio de su movimiento, aunque el contacto pueda tener diferente anchura o longitud, que equivale a la primera ley de la fricción que afirma que la fuerza de fricción es independiente del área de contacto aparente.

2) La fricción produce una cantidad de esfuerzo doble si el peso se duplica, que equivale a la segunda ley de fricción que afirma que la fuerza de fricción es proporcional a la carga aplicada [9].

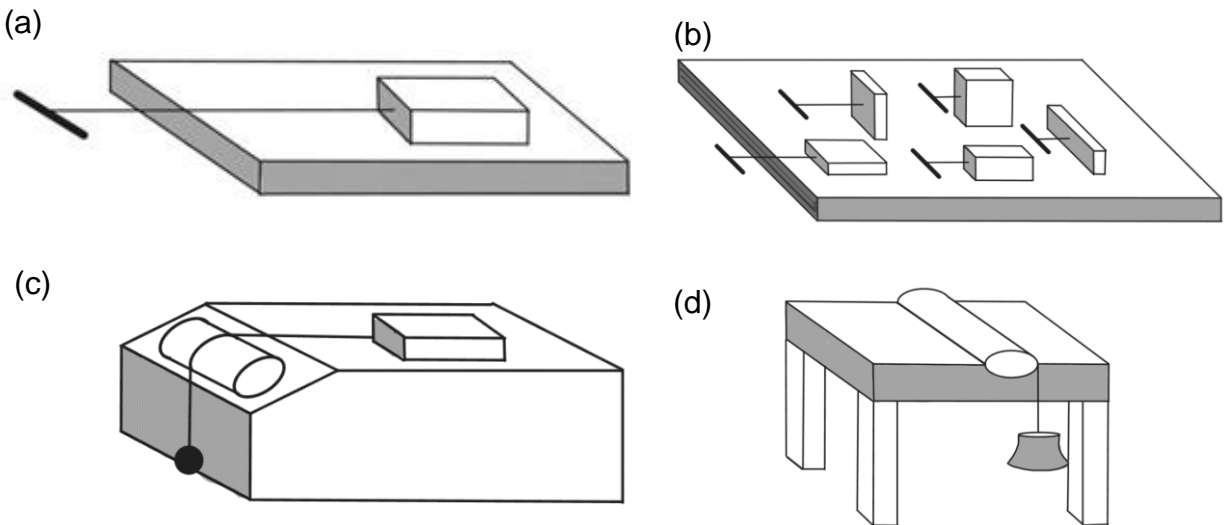


Fig. 1.21. Esquemas de las disposiciones experimentales de Leonardo Da Vinci en sus estudios sobre fricción: a y b) Estudio de fricción en superficie plana c) Estudio de fricción sobre un cilindro rodando sobre superficie plana, y d) Estudio de fricción de un objeto arrastrado por una cuerda [8].

B) Periodo previo a la primera Revolución industrial (1600 - 1750):

Durante el siglo XVII y la primera mitad del XVIII, el periodo previo a la Revolución Industrial, los principales avances en el campo de la tribología se pueden clasificar en tres tendencias diferentes:

- 1) Una mayor concienciación de la importancia y repercusión de los fenómenos de fricción y desgaste en la maquinaria.
- 2) Un desarrollo importante en el diseño de cojinetes.
- 3) Un desarrollo del estudio teórico de los procesos de fricción.

En cuanto al primer apartado, la toma en conciencia de lo que la fricción y el desgaste conllevan se pone de manifiesto en numerosas contribuciones de diferentes autores, que hacen referencia a la necesidad de tener en consideración los fenómenos de fricción y desgaste en el diseño de la maquinaria de la época.

Un ejemplo de esto son las aportaciones de Hooke en 1685[10], Amontons en 1699[11] y Desaguliers en 1734[12].

C) La segunda Revolución Industrial (1750 - 1850):

Durante el periodo comprendido entre la mitad del siglo XVIII y la mitad del siglo XIX, coincidente con la Revolución Industrial, las tendencias en el campo de la tribología, que eran bastantes claras y definidas durante el periodo anterior, se multiplican, mostrando un panorama general más complejo. Dentro de todas las vertientes existentes se pueden destacar algunas generales, como son el importante desarrollo en el diseño de cojinetes, ver Figs. 1.22 y 1.23, tanto planos como de piezas de rodadura, el estudio de la fricción y el incremento en la preocupación sobre la lubricación y en los lubricantes. En general, los trabajos que se desarrollaron en esa época son fundamentalmente trabajos con un gran sentido práctico. Este interés por tratar problemas concretos son consecuencia de la necesidad cada vez mayor de obtener cojinetes que sean adecuados para su utilización en las nuevas fuentes mecánicas de energía que aparecen durante este periodo de la historia (por ejemplo, molinos de viento y ruedas impulsadas por agua). Además de estas necesidades fundamentalmente prácticas otros factores exigen profundizar en mayor medida en el conocimiento de los fundamentos de la fricción y, en menor medida, de la lubricación y el desgaste. En esta línea, los avances más importantes y valorados durante este periodo fueron aquellos que resolvieron o abordaron problemas concretos surgidos en la industria del momento. Durante este periodo es obligado destacar y hacer mención especial a Charles Augustin Coulomb, ingeniero francés que consiguió en 1779 el premio de la academia Francesa de las Ciencias por su trabajo sobre la fricción. Coulomb confirmó los descubrimientos realizados previamente por otros autores sobre la fricción estática y extendió los estudios existentes sobre fricción cinética y rodadura, de tal forma que durante esta parte del siglo XVIII se pensó que el tema estaba completamente estudiado. En este periodo también aumento la conciencia de la importancia de los fenómenos de fricción, comenzándose a realizar estimaciones sobre las pérdidas de energía ocasionadas en la maquinaria como consecuencia de este fenómeno. Al final del periodo considerado se hizo, por primera vez, hincapié en los beneficios de la fricción. Anteriormente, todos los estudios sobre el tema se centraban en el esfuerzo necesario para vencer la fricción, sin embargo, la aparición de los embragues en los sistemas de transmisión de energía centró la atención en un aspecto nuevo y diferente del problema.

En este sentido, el desarrollo de las locomotoras de vapor planteó cuestiones sobre el esfuerzo de tracción y el cómo transmitirlo de la rueda al rail. Uno de los campos que, como se comentó anteriormente, se pueden destacar en este periodo es el desarrollo de los cojinetes. Los cojinetes de piezas rodantes siguieron acaparando la atención de los expertos de este campo, mientras que en los cojinetes planos el principal avance residió en un importante incremento de las combinaciones de metales empleados en su construcción. Uno de los cambios más importantes en este terreno es la sustitución casi completa de la madera por el hierro en la mayoría de las nuevas aplicaciones de maquinaria, por lo que los cojinetes metal-metal cobraron gran importancia [13].

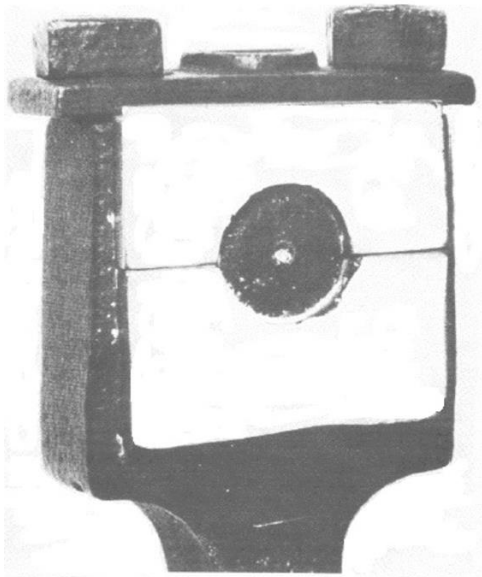


Fig. 1.22. Cojinete del primer barco de vapor, 1872 [10].

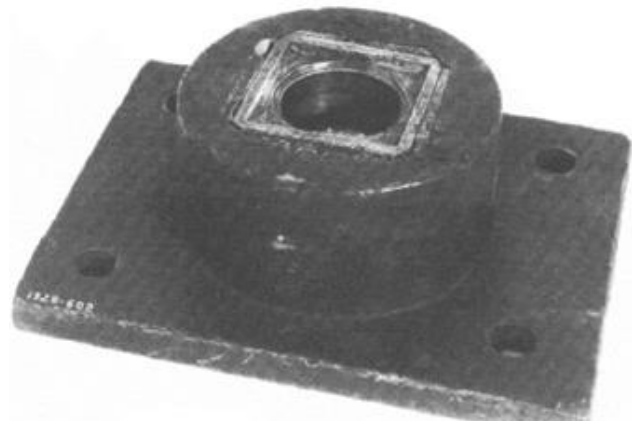


Fig. 1.23. Cojinete de inicios del siglo XIX [13].

D) 1850 - 1925. Lubricación:

El hecho más importante del periodo de historia comprendido entre los años 1850 y 1925 es el descubrimiento del aceite mineral y la enorme profundización en el estudio de la lubricación.

Antes de esta época, la lubricación fue un tema que acaparó muy poca atención por parte de los expertos; sin embargo, fueron varios los hechos que contribuyeron al cambio de esta tendencia durante este periodo de tiempo. Por una parte, y como ya se citó, el importante descubrimiento del aceite mineral y la sustitución de los aceites vegetales y animales como lubricantes, junto con el desarrollo del motor de vapor y de

los ferrocarriles, y por otra, el interés de los ingenieros del momento por la fiabilidad, la seguridad y la eficiencia de las máquinas lubricadas. En los primeros años de este periodo el interés de los estudiosos fue la búsqueda de un mayor conocimiento de la naturaleza de la lubricación, y se llevó a cabo de manera fundamentalmente empírica. A partir de ese instante se obtuvieron importantes resultados mediante los estudios experimentales y analíticos.

Gustav Adolph Hirn centró sus estudios en la relación entre el trabajo y el calor, lo que le llevó a considerar la naturaleza de la fricción. Confirmó las leyes de la fricción seca establecidas anteriormente por Amontons y Coulomb, y estudió la influencia de numerosos lubricantes en la fricción de cojinetes de bronce.

Hirn dedujo que sin la existencia de lubricante el coeficiente de fricción seguía la ley de Coulomb y era independiente de la carga, de la velocidad y del área aparente de contacto. En condiciones lubricadas, el coeficiente es aproximadamente proporcional a la raíz cuadrada de la carga, de la velocidad y del área aparente de contacto, ajustándose la potencia a la que se eleva la velocidad más a 1 que a $\frac{1}{2}$ cuando la lubricación es adecuada y las cargas moderadas [14].

E) 1925 - 1970. Desgaste:

Igual que en el período anterior, los mayores avances se consiguieron en el campo de la lubricación. Es en este período donde se estudia con más detalle el desgaste, apareciendo también otros avances que se mencionan en este apartado.

Para entender el contacto seco entre sólidos, la fricción, el desgaste y algunas formas de lubricación, es importante tener conocimiento acerca de la superficie de contacto. Los métodos físicos para estudiar las superficies, llamados métodos perfilométricos, fueron introducidos por Abbot y Firestone (1933) en la universidad de Michigan [15]. El procedimiento conocido como micro cartografía, en el cual, largas cadenas de números cierran el espacio paralelo a los trazados superficiales, y se usan para generar mapas de contorno de las superficies, fue desarrollado en la década de 1960 por Greenwood y Williamson [16].

F) Actualidad:

Uno de los principales problemas que aparecen en el campo de la tribología cuando se trata de estudiar el comportamiento frente al desgaste de los materiales, es la imposibilidad de simular totalmente las condiciones reales de servicio en los laboratorios. Inicialmente cada laboratorio se centró en diseñar sus propios procedimientos de ensayo, lo que dio lugar a una gran cantidad de posibilidades diferentes. Esta situación se vio claramente retratada cuando el Laboratorio Nacional de Física del Reino Unido realizó un estudio en el que identificó que se estaban llevando a cabo en todo el mundo más de cuatrocientos ensayos de desgaste diferentes, con sus diferentes variables y parámetros característicos. En 1973 la Sociedad Americana de Ingeniería de Lubricación revisó este estudio, y concluyó que los ensayos que se empleaban en varios laboratorios ascendían a trescientos. Sin embargo, muchos de estos ensayos son ligeras modificaciones unos de otros, estimándose la cifra final de número de ensayos inferior a los cien. En 1997 de nuevo el Laboratorio Nacional de Física del Reino Unido llevó a cabo una encuesta entre los usuarios de equipamiento tribológico con el objetivo de determinar los tipos de ensayos que se utilizaban para cada problema concreto, encontrándose con una gran variedad de posibilidades en cuanto a equipamiento y condiciones de operación.

Tanto es así, que en el volumen correspondiente de los Annual Books of ASTM Standard existen más de diez normas diferentes para determinar el comportamiento frente al desgaste con más de diez procedimientos diferentes. Todas estas normas hacen especial hincapié en que los resultados obtenidos no pueden ser extrapolados a las condiciones de servicio, si no que únicamente son válidos para clasificar los materiales objeto de estudio [17].

Algunos autores han resaltado el problema de la elección del ensayo para el análisis del comportamiento al desgaste de los materiales, cuestionando la correlación que se puede determinar entre los resultados obtenidos con distintos procedimientos, así como la extrapolación de estos resultados a las condiciones de servicio [17].

1.2.2. DESGASTE EN METALES

El proceso de desgaste es el deterioro sufrido por dos superficies en contacto a causa de la interacción de sus rugosidades superficiales, esta interacción depende de la magnitud de la fuerza de presión que tiende a mantener en contacto ambas superficies. Fricción es la resistencia al movimiento que se produce cuando dos objetos sólidos que se encuentran en contacto, son puestos en movimiento relativo uno con respecto del otro [18].

En el ámbito de la ingeniería mecánica específicamente en el área de estudio de ingeniería de superficies, el fenómeno del desgaste se define como la reducción de material en las superficies en contacto cuando dos objetos experimentan movimiento relativo bajo la influencia de una fuerza externa. En consecuencia, siempre que se presente un desplazamiento relativo entre dos sólidos sujetos a carga, se origina una potencial situación de desgaste. Dicho movimiento puede ser unidireccional o de vaivén, involucrando deslizamiento o rodamiento. En casos de rodamiento y deslizamiento, también es posible encontrar combinaciones de ambos o incluso desgaste derivado de movimientos oscilatorios de pequeña amplitud. Para entender de manera completa el proceso de desgaste, es esencial investigar la topografía y las propiedades intrínsecas de las superficies en interacción. De ahí que el grado de deformación que se manifiesta en las capas superficiales y subsuperficiales de los materiales desempeñe un papel fundamental en el mecanismo subyacente de fricción y desgaste. En este sentido, al analizar la naturaleza y magnitud del desgaste entre dos superficies en contacto, es imperativo considerar tanto los esfuerzos de contacto involucrados como los diversos modos de movimiento que influyen en el proceso [18].

1.2.3. TIPOS DE DESGASTE

El desgaste se puede clasificar de acuerdo a la naturaleza de las superficies en contacto, de la forma siguiente [19]:

- 1) Metal contra metal

2) Metal contra no metal

3) Metal contra fluido.

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

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 [19].

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 [19].

El desgaste por erosión es causado por un fluido a alta presión con partículas sólidas en suspensión las cuales al impactar sobre una superficie arrancan material de ella debido a los efectos de momentum de las partículas. La pérdida de material puede ser significativa, provocando roturas por fatiga. El grado de desgaste tiene relación con el ángulo de incidencia de la partícula con respecto a la superficie [19].

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

El desgaste por cavitación se origina en superficies entre las que existe fluido, el cual da origen a la formación de burbujas de vapor cuando éste llega a una presión menor que la presión de vapor. Estas burbujas son transportadas por el fluido hasta una región de mayor presión, donde el vapor regresa al estado líquido de forma súbita aplastándose bruscamente las burbujas. Si las burbujas de vapor se encuentran cerca o en contacto con una de las superficies cuando cambian de estado se producen presiones localizadas muy altas, ocasionando picaduras en dicha superficie [19].

Desgaste por fatiga, surge como resultado de las cargas cíclicas, el cual probablemente es el mecanismo predominante de la mayoría de tipos de desgaste. Sin embargo, considerar que un tipo particular de falla ha sido originado por fatiga resulta un tanto confuso, por lo que se reserva el uso del término solamente a la falla entre contactos lubricados, como en el caso de los rodamientos de bolas o rodillo, engranes, levas y entre otros mecanismos [19].

1.2.4. APLICACIÓN DE LOS RESULTADOS DE DESGASTE

Con frecuencia se tiene una discrepancia entre los estudios teóricos y experimentales sobre la razón de desgastes en metales y materiales y en la aplicación de estos resultados a las situaciones industriales. Esto no es necesariamente así y lo que se busca es que haya concordancia entre ambos criterios.

Cada vez que se investiga un nuevo material, la primera fase del trabajo consiste por lo general en una evaluación de la cantidad de desgaste al incrementar la distancia de deslizamiento. Al determinar la pendiente del desgaste estacionario (constante), el paso siguiente es graficar la razón de desgaste contra la carga.

Cuando la carga es baja, el régimen de desgaste es moderado, seguido por un régimen de transición cuando la razón de desgaste aumenta algunos órdenes de magnitud, lo que se puede apreciar en la Fig. 1.24 [20].

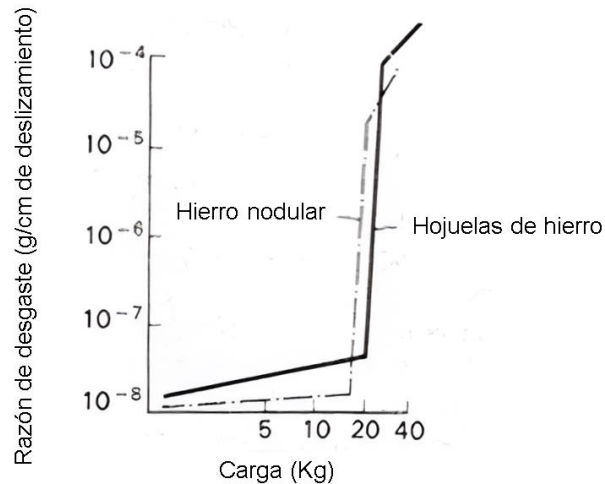


Fig. 1.24. Comportamiento de la carga a razón del desgaste [20].

Por lo general los investigadores en este tipo de estudios por su relevancia, no se detienen aquí, sino que siguen incrementando la carga hasta obtener una curva completa de la razón de desgaste en relación a la carga. Sin embargo, aunque es posible en la vida real, no se espera que una máquina trabaje en condiciones que excedan el régimen de desgaste moderado, para un estudio más profundo de este fenómeno, se debe tomar en consideración estos efectos [20].

1.2.5. VARIABLES QUE AFECTAN EL PROCESO DE DESGASTE

La complejidad en el estudio del desgaste se acentúa al considerar el número de factores necesarios para describirlo. Los principales factores que intervienen en el desgaste se pueden enumerar de la forma siguiente [20]:

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

Además, el desgaste que ocurre en la práctica es, en la mayoría de los casos, una combinación de los diferentes tipos de desgaste. Pequeñas partículas que se encuentran entre dos superficies en contacto pueden dar como resultado un desgaste por abrasión,

o bien los productos resultantes del proceso de corrosión pueden dar como resultado el desgaste y un daño posterior [20].

1.2.6. EFECTO DE LA TEMPERATURA Y LA VELOCIDAD

Se ha demostrado que el desgaste de los metales depende principalmente de la interacción de asperezas entre dos superficies que deslizan. La energía disipada debido al trabajo mecánico inevitablemente ocasiona un incremento en la temperatura, aunque esto sucede de manera intermitente en lo que se refiere a los puntos de contacto real por la adherencia y posterior deslizamiento de las uniones. Estos incrementos momentáneos de temperatura tienen una duración del orden de 10^4 s. El calor que se desprende en la fricción se disipa en el área circundante, lo que ocasiona que las puntas de las asperezas alcancen temperaturas elevadas, aunque el cuerpo del componente permanezca relativamente frío. Un incremento en la carga o en la velocidad de deslizamiento aumenta la temperatura de las uniones y, en casos extremos, puede causar fusión incipiente [21].

No se tiene una forma simple de medir las temperaturas de las áreas reales de contacto, aunque se puede obtener la temperatura general de un par de metales en interacción. Puesto que tanto la ley del desgaste por adherencia como la del desgaste por abrasión consideran que las propiedades mecánicas como esfuerzo de fluencia y dureza del metal se ven afectadas por el ambiente térmico, es por ello que es conveniente realizar un estudio de la fricción y del desgaste a temperaturas altas, lo cual resulta importante debido a que las partes rotatorias deben trabajar a altas temperaturas [21].

1.2.7. EFECTO DE LA CARGA Y LA DISTANCIA DE DESLIZAMIENTO

Se ha descubierto que el desgaste se incrementa de forma casi proporcional a la carga. Sin embargo, esta relación se pierde con el calor de fricción. Si un metal como el cobre se presiona sobre el acero, cierta cantidad de cobre se transfiere al acero, de esa manera el área de la unión se podría estimar utilizando radio trazadores [21].

Rabinowicz demostró que la masa (M) de la fracción más grande de residuo se podría relacionar con la carga normal aplicada F.

$$M = CF^\alpha \quad (1.3)$$

donde: C es una constante, de proporcionalidad que relaciona la masa de desgaste con la carga aplicada.

F es la carga nominal aplicada en el ensayo de desgaste.

α es un exponente que determina cómo varía la masa de desgaste con respecto a la carga. El valor de α puede ser positivo, negativo o incluso cero.

El uso de esta ecuación permite estimar la relación entre la carga aplicada y la masa de desgaste observada en el ensayo. La constante C y el exponente α se ajustarán experimentalmente para el material y las condiciones de ensayo específicas. Este tipo de relación puede ser útil para predecir cómo será la variación del desgaste en función de diferentes niveles de carga aplicada en un ensayo de desgaste determinado [21].

Lipson (1960) enunció como regla general que ante esfuerzos inferiores a 1/3 BHN (aproximadamente en el punto de fluencia), el desgaste será independiente de la carga. Se ha determinado que la tasa de desgaste es linealmente proporcional a la distancia recorrida. Los resultados de experimentos realizados por Piggott y Wilman (1957), graficados en la Fig. 1.24 se presenta que el desgaste se inicia linealmente y después describe una curva exponencial [21].

En este tipo de experimentos cabe notar dos aspectos:

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

1.3. ESTUDIO DE DESGASTE

El estudio de desgaste es una investigación crucial en el campo de la ingeniería y la metalurgia, ya que esta es destinada a comprender y prever los mecanismos por los cuales los materiales pierden volumen o sufren deterioro bajo condiciones específicas de operación. El desgaste se puede manifestar de diversas formas, incluyendo desgaste abrasivo, adhesivo, corrosivo, y erosivo, cada uno de los cuales está influenciado por factores como la carga, la velocidad, el tipo de material y el ambiente de trabajo.

1.3.1. TIPOS DE MÁQUINAS PARA REALIZAR ENSAYOS DE DESGASTE

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

a) Espiga sobre mesa oscilante.

Esta máquina está constituida por los componentes siguientes (ver Fig. 1.25): una superficie plana capaz de moverse en las direcciones de la flecha (1), la espiga (2) está fija en un anillo (5), la carga normal se aplica por medio del tornillo (3) y ésta se evalúa por la deflexión del anillo, un brazo horizontal (4) fijo a una suspensión bifilar está también fijo al anillo (5) y el arrastre friccional provoca una deflexión que se puede medir.[22].

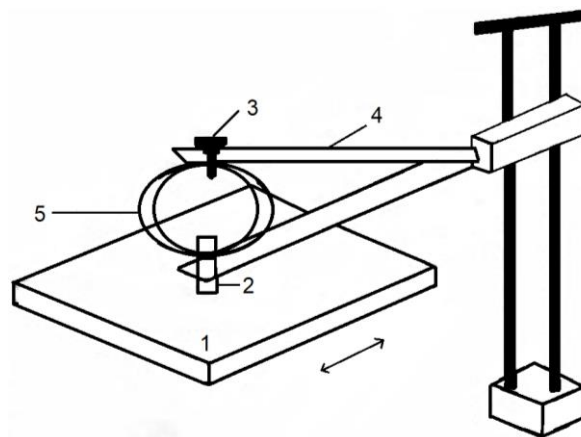


Fig. 1.25. Esquema de máquina tipo espiga sobre mesa oscilante [22].

b) Espiga sobre buje

En esta máquina (ver Fig. 1.26) la espiga (2) se fija a una barra horizontal de carga (3). Luego de sujeta la espiga se coloca sobre un buje rotatorio (1). La barra de carga está fija a un resorte (4) y el otro extremo está fijo a un soporte rígido (5). El arrastre friccional hace que el resorte se estire y éste mueva una aguja (6) la cual se encuentra unida a un trozo de hierro suave suspendido en un campo magnético. La deflexión de la aguja debido a la fricción hará que el núcleo se mueva provocando un cambio de fuerza del campo inducido. La señal resultante se puede amplificar y registrar [22].

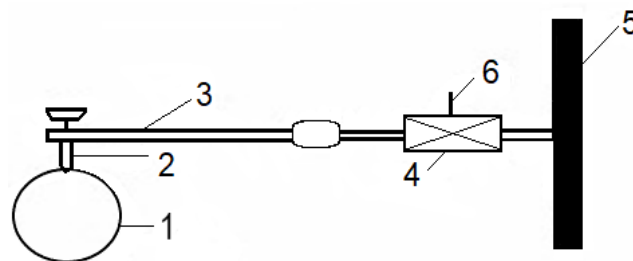


Fig. 1.26. Esquema de máquina tipo espiga sobre buje [22].

c) Cilindros cruzados

Consiste en una espiga cilíndrica (1) y se coloca sobre un cilindro giratorio de mayor diámetro. La espiga se encuentra acoplada a un resorte (2) el cual se deforma debido al arrastre friccional, dicha deformación es censada por un transductor (3). El esquema de este tipo de máquina se presenta en la Fig. 1.27 [22]

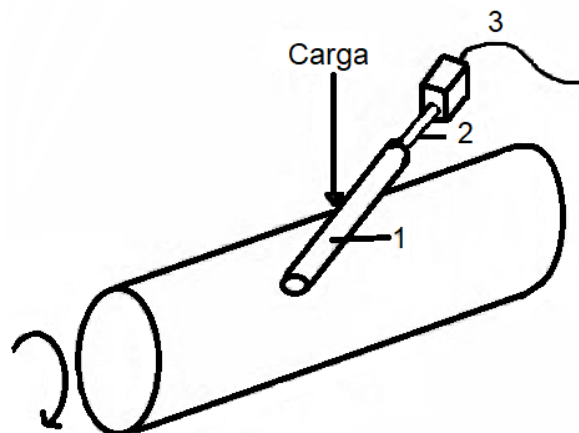


Fig. 1.27. Esquema de máquina tipo cilindros cruzados [22].

d) Espiga sobre cilindro

Está constituida por una espiga de geometría cilíndrica o hemisférica (1) que está acoplada sobre un cilindro, que gira a determinadas rpm. La deflexión de la espiga debida a la fricción se mide por medio de transductores o calibradores de deformación acoplados a la sección reducida (2). El esquema de este tipo de máquina se presenta en la Fig. 1.28 [22].

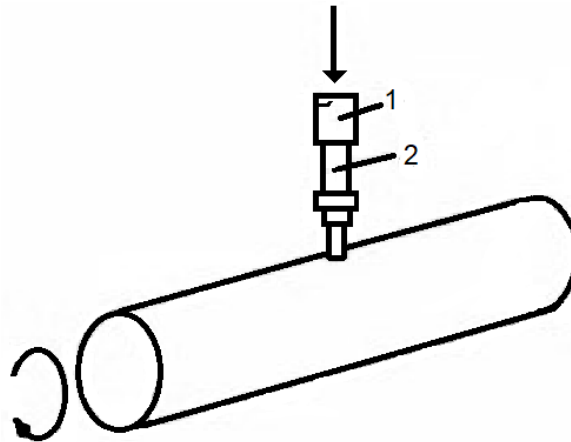


Fig. 1.28. Esquema de máquina espiga sobre cilindro [22].

e) Máquina de cuatro bolas

El propósito principal de esta máquina es evaluar las propiedades antiadherentes de los aceites, aunque también se puede utilizar para determinar la razón de desgaste, esta máquina funciona así: en un anillo se colocan tres bolas de acero de 12.5 mm de diámetro que están en contacto entre sí y una cuarta bola se fija al extremo de una barra vertical, la cual queda en contacto con las otras tres bolas inferiores. Una palanca que soporta un peso ajustable comprime las tres bolas estacionarias sobre la cuarta y el momento de torsión que se transmite se mide durante la rotación de la barra vertical. El coeficiente de fricción se registra durante la prueba y se miden las huellas causadas por el desgaste sobre las tres bolas. En la Fig. 1.29 se presenta esquemáticamente [22].

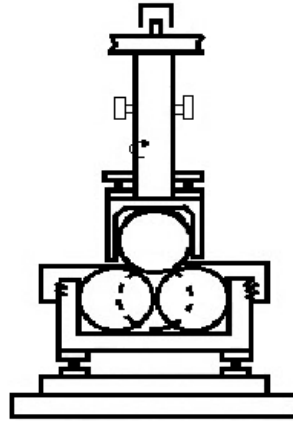


Fig. 1.29. Esquema de máquina tipo cuatro bolas [22].

f) Máquina de discos

En la máquina de discos, se hace rotar un disco sobre otro, con una carga dada, tal como normalmente se hace para simular estudios de diseño de engranes. Un disco se encuentra sobre un rodamiento rígido, mientras que el otro se sujeta a un dispositivo oscilante [22].

g) Máquina de espiga sobre disco

Es usada para pruebas de desgaste, en ella la espiga (1) se coloca perpendicularmente a un disco giratorio (2). Las variables que rigen las pruebas son la carga normal, la velocidad de deslizamiento, la atmósfera y la temperatura ambiente. La cantidad de desgaste se puede establecer pesando la espiga en una balanza analítica. Lo anterior descrito se presenta en la Fig. 1.30 [22].

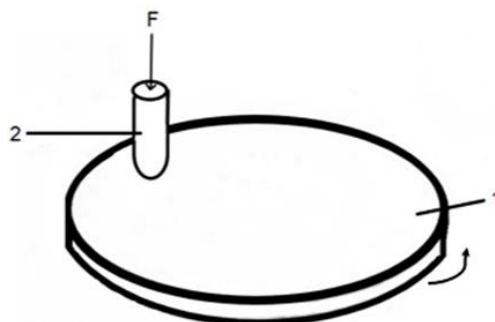


Fig. 1.30. Esquema de máquina tipo espiga sobre disco [22].

1.3.2. NORMA ASTM PARA ENSAYO DE DESGASTE

El ensayo de desgaste tipo espiga sobre disco es una técnica fundamental utilizada en la caracterización de materiales para evaluar su resistencia al desgaste y su comportamiento frente a la fricción. Este método, definido por la norma ASTM G99 denominada: “Método estándar para prueba de desgaste espiga sobre disco”, proporciona un enfoque estandarizado para simular condiciones de desgaste que pueden ocurrir en una variedad de aplicaciones industriales. Esta norma se detalla a continuación:

- ✓ Alcance: Este método de prueba cubre un procedimiento de laboratorio para determinar el desgaste de materiales durante el deslizamiento utilizando un aparato de pasador sobre disco. Los materiales se prueban en pares bajo condiciones nominalmente no abrasivas. Se describen las principales áreas de atención experimental en el uso de este tipo de aparatos para medir el desgaste. También, se puede determinar el coeficiente de fricción [23].
- ✓ Resumen del método de prueba: Para la prueba de desgaste de espiga sobre disco, se requieren dos componentes. El primero es una espiga con una punta redondeada, que se coloca perpendicular al segundo componente que es un disco circular plano. La espiga se presiona contra el disco con una carga específica por medio de un brazo de palanca y pesos adjuntos. Los resultados del desgaste se informan como pérdida de volumen en milímetros cúbicos para la espiga y el disco por separado. Cuando se prueban dos materiales diferentes, se recomienda que cada material se pruebe tanto como espiga, así como disco. La cantidad de desgaste se determina midiendo las dimensiones lineales apropiadas de la espiga y del disco antes y después de la prueba o pesando ambas antes y después de la prueba. Los resultados del desgaste generalmente se obtienen realizando una prueba para una distancia de deslizamiento seleccionada y para valores de carga seleccionados así también para velocidad. Los resultados de desgaste se pueden reportar como gráficos de volumen de desgaste contra distancia de deslizamiento, estos gráficos pueden mostrar (valores no lineales, relaciones entre el volumen de desgaste y la distancia en ciertas porciones de la distancia total de deslizamiento y relaciones lineales en otras porciones) [23].

- ✓ Aparato: Un tipo de sistema típico consiste en un husillo accionado y un mandril para sostener el disco giratorio, un dispositivo de brazo de palanca para sostener el pasador y accesorios, para permitir que la espiga sea forzada contra el disco giratorio con una carga controlada. Este tipo de sistema carga la espiga que gira alrededor del centro del disco estacionario, la pista de desgaste del disco es un círculo que implica múltiples pasadas de desgaste en la misma pista. El sistema puede poseer un sistema de medición de la fuerza de fricción, y una celda que permite determinar el coeficiente de fricción. En la Fig. 1.31 se presenta un dibujo esquemático de un sistema típico de prueba de desgaste de pasador sobre disco [23].
- ✓ Parámetros de prueba: Carga: Valores de fuerza en Newtons en el momento del desgaste. Velocidad: La velocidad de deslizamiento relativa entre las superficies de contacto en metros por segundo. Distancia: Distancia de deslizamiento acumulada en metros [23].

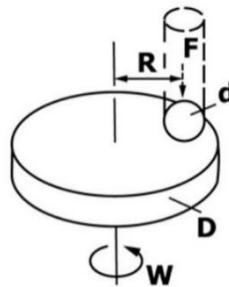


Fig. 1.31. Dibujo esquemático de un sistema típico de prueba de desgaste [23]

- ✓ Procedimiento:
 - Inmediatamente antes de la prueba y antes de medir o pesar, se debe limpiar y secar las espigas a utilizar. Se debe tener cuidado de eliminar toda la suciedad y materias extrañas. Se debe utilizar agentes de limpieza y disolventes [23].
 - Medir las dimensiones de las espigas al más cercano 2.5 μm de mm o pesar con una precisión de 10^{-4} g [23].
 - Insertar el disco de forma segura en el dispositivo de sujeción de modo que el disco quede fijado perpendicular al eje de revolución [23].

- Insertar la espiga de forma segura en su soporte y si es necesario se debe ajustar para que la espiga quede perpendicular a la superficie del disco cuando este en contacto, para mantener las condiciones de contacto necesarias [23].
- Agregar la masa adecuada a la palanca del sistema para desarrollar la fuerza seleccionada presionando el pasador contra el disco [23].
- Arrancar la máquina y ajustar la velocidad al valor deseado mientras mantiene la espiga fuera de contacto con el disco [23].
- Configurar el cuentarrevoluciones o equivalente al número deseado de revoluciones [23].
- Comenzar la prueba con la espiga y el disco en contacto bajo carga. La prueba se detiene cuando se alcanza el número deseado de revoluciones. [23].

1.3.3. ENSAYO TIPO ESPIGA SOBRE DISCO

Para los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco, se requieren dos especímenes. Se posiciona una espiga con una punta hemisférica, perpendicular al disco. La trayectoria del deslizamiento es un círculo en la superficie del disco. El plano del disco se puede orientar horizontalmente o verticalmente [24].

La espiga normalmente se coloca contra el disco a una carga dada por medio de un brazo o palanca a la cual se le agregan pesos. Se pueden usar otros métodos de carga, tales como: hidráulico o neumático [24].

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

relaciones geométricas. Con frecuencia se usan las medidas lineales de desgaste puesto que la pérdida de masa es a menudo demasiado pequeña para medirla con precisión. Los resultados de desgaste normalmente son obtenidos realizando los ensayos para una distancia de deslizamiento, carga y velocidades seleccionadas [24].

Los resultados de desgaste pueden ser graficados como volumen de desgaste versus distancia de deslizamiento utilizando varios especímenes para diferentes distancias de deslizamiento. Dichos gráficos pueden presentar relaciones lineales y no lineales entre volumen de desgaste y la distancia de deslizamiento en ciertas porciones de distancia de deslizamiento recorrida. La causa de dichas diferencias se debe al período de asentamiento y a la transición entre diferentes regiones de mecanismos dominantes de desgaste. La magnitud de tales períodos no-lineales depende de los limitantes del sistema de la prueba, materiales, y condiciones de la prueba [24].

1.3.4. MODELOS DE MÁQUINAS TIPO ESPIGA SOBRE DISCO

A continuación, se presentan diferentes modelos de máquinas utilizadas por laboratorios internacionales para la realización de ensayos de desgaste, dichos modelos serán tomados como una referencia al equipo a utilizar.

a) Tribómetro CSEM

Un tribómetro es un dispositivo utilizado para medir y analizar las propiedades de fricción y desgaste de materiales cuando están en contacto y en movimiento relativo. Sin embargo, "CSEM" no es un acrónimo o término comúnmente conocido en relación con tribómetros (ver Fig. 1.32) [25].



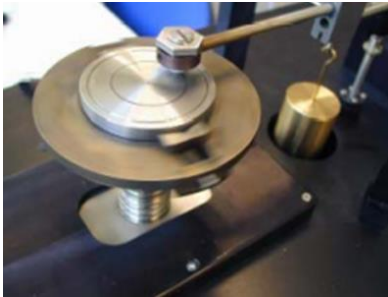
Fig. 1. 32. Tribómetro CSEM [25].

Características:

- ✓ Cargas aplicadas: 1, 2, 5 y 10 N (máximo de 60 N)
- ✓ Precisión; 10 m·N (1 g)
- ✓ Fuerza de fricción: >10 N (40 N opcional)
- ✓ Velocidad de rotación: 0.3 a 500 rpm (1,500 rpm opcional)
- ✓ Dimensiones del disco: r es 60 mm, h es 35 mm (r es 140 mm opcional)

b) FALEX ISC – 200PC

Es un equipo avanzado de prueba de desgaste y fricción diseñado para llevar a cabo una variedad de pruebas tribológicas. Este tribómetro está diseñado para proporcionar mediciones precisas y reproducibles de las propiedades de fricción y desgaste entre materiales en una variedad de condiciones. Su diseño modular y versátil permite una amplia gama de configuraciones de pruebas, incluidas las pruebas de espiga sobre disco (ver Fig. 1.33) [26].



Características:

- ✓ Cargas aplicadas arriba de 10 N
- ✓ Radio de la espiga 0.0625 a 0.25 pulg
- ✓ Velocidad de rotación >1800 rpm Dimensiones del disco Arriba de 2.75 pulg de diámetro

Fig. 1.33. FALEX ISC-200PC [26].

1.3.5. ESPECIFICACIONES DEL ACERO SAE 3115

El acero SAE 3115 es un acero de baja aleación que se utiliza principalmente en aplicaciones donde se requiere alta resistencia y tenacidad. Algunas especificaciones de este acero son [27].:

Composición química:

- ✓ Carbono (C): 0.13 - 0.18%
- ✓ Manganeso (Mn): 0.70 - 0.90%
- ✓ Fósforo (P): $\leq 0.035\%$
- ✓ Azufre (S): $\leq 0.040\%$
- ✓ Cromo (Cr): 0.90 - 1.10%
- ✓ Níquel (Ni): 3.25 - 3.75%

Propiedades físicas:

- ✓ Peso específico: 7.83 g/cm^3
- ✓ Conductividad térmica: 44.0 W/mK

- ✓ Calor específico: 431 J/kg·K
 - ✓ Resistencia eléctrica: 0.12 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$
 - ✓ Módulo elástico: 210,000 N/mm²
- Propiedades mecánicas:
- ✓ Tratamiento térmico: Recocido.
 - ✓ Resistencia a la tracción: 75 - 100 kg/mm²
 - ✓ Límite de fluencia: 55 - 70 kg/mm²
 - ✓ Dureza: 62 - 64 HB

1.4. NORMATIVA AMBIENTAL SOBRE TALA DE ÁRBOLES

Las siguientes normas fueron extraídas de la Ley Forestal de El Salvador en el decreto N° 852.

1.4.1. DEL MANEJO DE LOS BOSQUES NATURALES PRIVADOS

Exención del plan de manejo forestal [28].

Art. 10.- La tala, poda y raleo con fines de protección y saneamiento en los bosques naturales, quedan exentos del plan de manejo.

Aprovechamiento por causas naturales.

Art. 11.- El aprovechamiento de los productos y subproductos forestales provenientes de árboles dañados o derribados por causas naturales dentro de bosques naturales será autorizado por el MAG a sus propietarios o poseedores.

Árboles en zonas urbanas.

Art. 14.- El MAG recomendará cuales son las especies adecuadas para ornato en la zona urbana. Art. 15.- La regulación sobre siembra, poda y tala de árboles en zonas urbanas será de competencia exclusiva de la municipalidad respectiva.

1.4.2. MANEJO DE PLANTACIONES FORESTALES PRIVADAS Y APROVECHAMIENTO PERMITIDO

Aprovechamientos permitidos [28].

Art. 17.- Quedan exentos del requerimiento de los planes de manejo forestal y de cualquier tipo de autorización, los siguientes aprovechamientos:

- ✓ El corte, tala y poda de los árboles de sombra de cafetales y otros de diferentes especies que se encuentren dentro de la plantación de café, siempre que la actividad busque la conservación y mejoramiento de esta y que los árboles no se encuentren incluidos en los listados de especies amenazadas o en peligro de extinción o que se trate de árboles históricos;
- ✓ El corte, tala y poda de frutales, así como otros cultivos agrícolas permanentes; y la tala y poda de árboles aislados ubicados en suelos con vocación agrícola o ganadera, siempre que no se trate de árboles históricos y que no se encuentren entre las especies amenazadas o en peligro de extinción; y
- ✓ La tala de árboles con capacidad de rebrote sin llegar a su eliminación total.

1.4.3. DE LA OBLIGACIÓN DE PROBAR ORIGEN DE PRODUCTOS FORESTALES

Obligación de probar origen de madera [28].

Art. 18.- Para el transporte de productos forestales maderables y no maderables provenientes de árboles aislados y sistemas agroforestales que no posean plan de manejo, el MAG emitirá el permiso correspondiente.

Art. 19.- Toda persona natural o jurídica que transporte, almacene, comercialice o industrialice productos forestales maderables y no maderables bajo un plan de manejo, deberá probar con los documentos correspondientes su legal procedencia por medio de un formato extendido por el productor, el que deberá contener el número de registro forestal emitido por el MAG.

1.4.4. PROTECCIÓN FORESTAL

Uso restringido [28].

Art. 23.- Se declaran Áreas de Uso Restringido, las superficies de inmuebles en las que sus propietarios tendrán la obligación de manejar de manera sostenible la vegetación existente, en los siguientes casos:

- ✓ Los terrenos que bordeen los nacimientos de agua o manantiales, en un área que tenga por radio por lo menos veinticinco metros, o lo que determine el estudio técnico respectivo, medidos horizontalmente a partir de su máxima crecida;
- ✓ Los terrenos riberaños de ríos y quebradas, en una extensión equivalente al doble de la mayor profundidad del cauce, medida en forma horizontal a partir del nivel más alto alcanzado por las aguas en ambas riberas, en un período de retorno de cincuenta años;
- ✓ Los terrenos en una zona de cincuenta metros medida horizontalmente, a partir de su más alta crecida en tiempo normal de los lagos y lagunas naturales y de las riberas de los embalses artificiales construidos por el Estado o por particulares, la cual deberá estar permanentemente arbolada;
- ✓ Los terrenos de las partes altas de las cuencas hidrográficas, en especial las que están en zonas de recarga hídrica; y
- ✓ Las áreas que por su potencial de deslizamiento debido a fuertes pendientes constituyen un peligro para las poblaciones.

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es analizar el efecto de la cementación utilizando carbón vegetal de bálsamo templado y revenido a 200 °C en la resistencia al desgaste del acero SAE 3115 bajo condiciones de carga y fricción, la razón de que se seleccionó este acero en específico es por la naturaleza del mismo ya que es un acero fabricado y además recomendado para la cementación.

Respecto a la selección del carbón vegetal de bálsamo es para la caracterización de este tipo de madera y para el aporte práctico y científico del uso de este tipo de madera en el proceso de tratamiento termoquímico de cementación dado que en la actualidad no existen estudios que presenten información sobre la viabilidad del uso de este tipo de madera en la cementación.

2. DISEÑO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe cada etapa a realizar en el desarrollo del estudio de desgaste tipo espiga sobre disco, dicho proceso comprende en primera instancia el maquinado de los discos. Se fabricaron tanto 41 discos de 50 mm de diámetro y 10 mm de espesor de acero SAE 3115, como también 37 espigas de sección plana de 4 mm de diámetro y longitud de 25 mm de acero SAE O1.

También, se presentan las especificaciones del tratamiento termoquímico de cementación que se realizará en 22 de los 41 discos, incluyendo la descripción de su respectivo post-tratamiento térmico. Al mismo tiempo todas las espigas de acero SAE O1 se someterán a un temple y revenido.

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

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

2.1. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En la Fig. 2.1 se presenta el diagrama de flujo de la metodología experimental a realizar, es importante conocer los pasos que se realizarán y su secuencia. Como se citó en la introducción de este capítulo, primero se dimensionan las espigas y los discos para luego realizar su correspondiente maquinado. Posteriormente, se mencionan los procesos de tratamientos térmicos y el proceso del tratamiento termoquímico, que incluyen etapas de limpieza. Finalmente, se llevaron a cabo los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco bajo las diferentes condiciones de estudio.

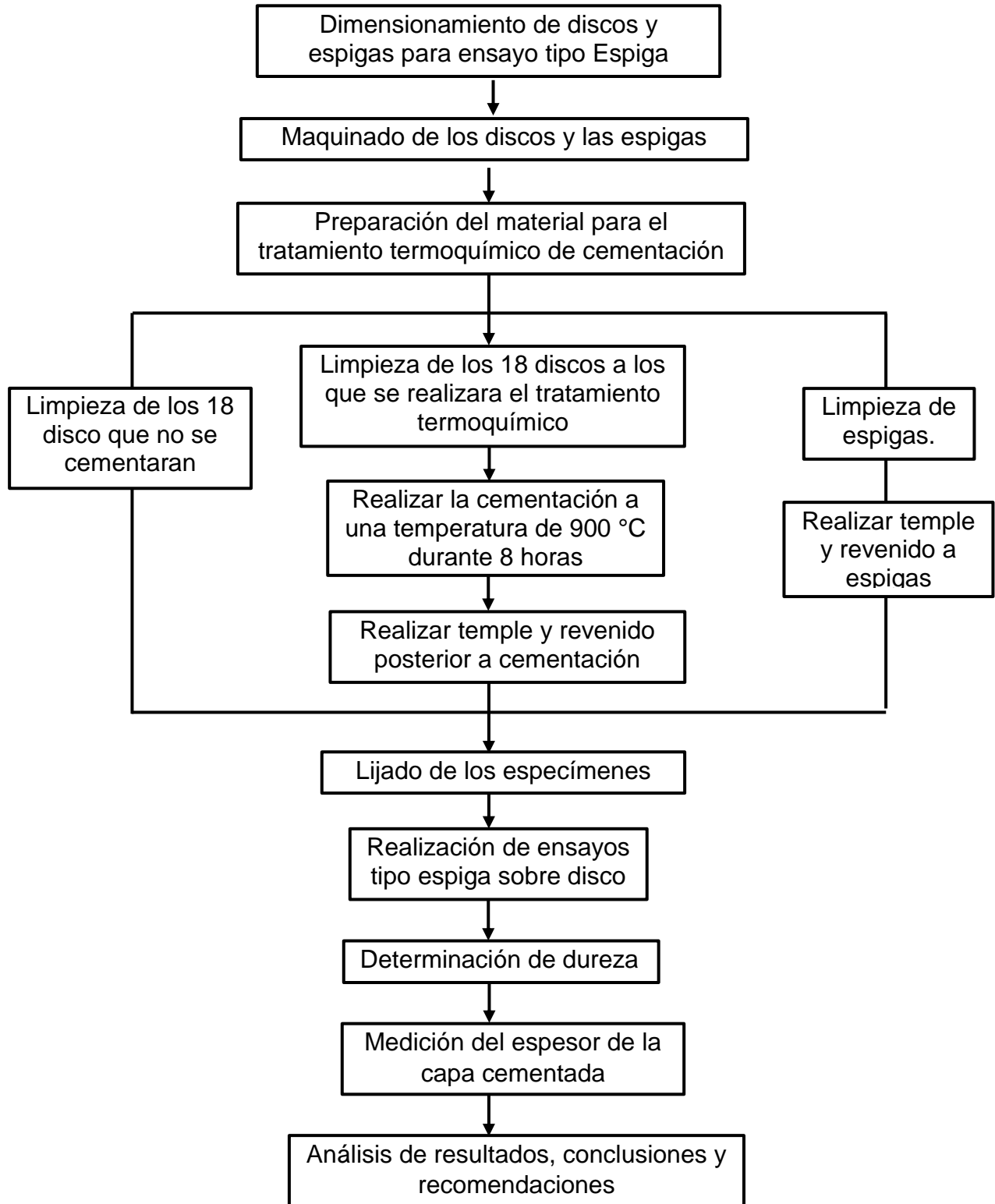


Fig. 2.1. Diagrama de flujo de la metodología experimental.

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

El dimensionamiento de los discos se realiza conforme al manual del módulo para ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco de la marca GUNT, modelo TM 260.3. Este dispositivo se utiliza junto 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 3115 como de la espiga de acero SAE O1; el disco tiene un diámetro de 50 mm y un espesor de 10 mm, con un chaflán de 1 mm a 45° en ambas caras y un agujero de 4.37 mm. Este agujero permite sujetar el disco al vaso portador mediante un perno, existiendo holgura entre el perno y el disco, por lo que no se requiere un ajuste preciso. La espiga tiene un diámetro de 4 mm y una longitud de 25 mm [24].

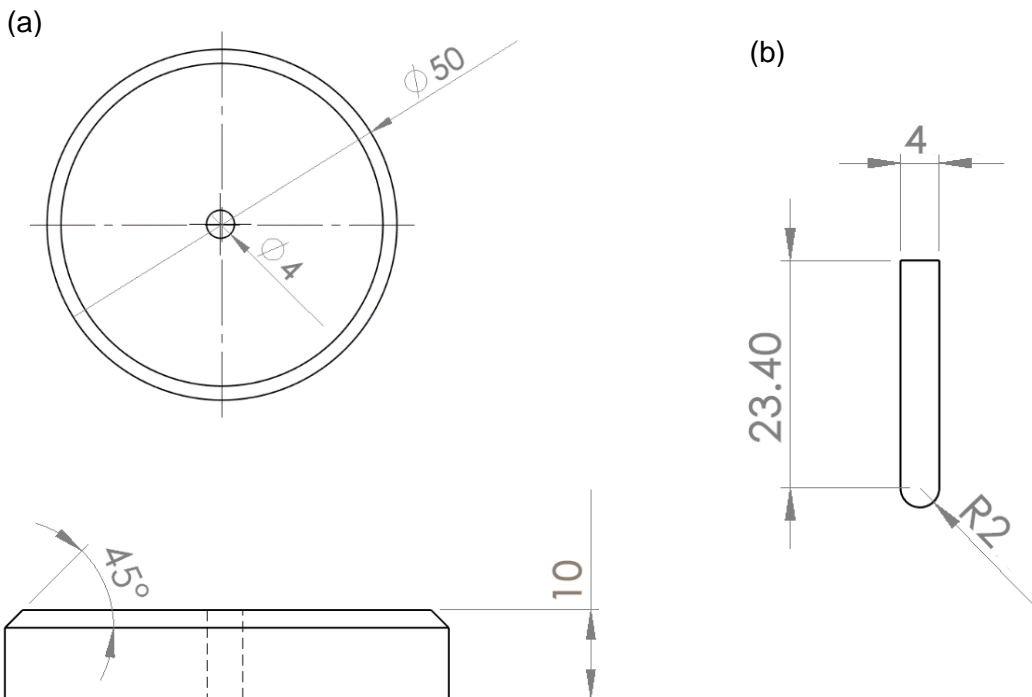


Fig. 2.2. Esquema de: a) Disco; y b) espiga. Cotas en mm.

2.3. MAQUINADO DE LAS ESPIGAS Y LOS DISCOS

Los discos de acero SAE 3115 se fabrican a partir de una barra cilíndrica con un diámetro de 50.80 mm (2 pulg) y de 12.7 mm (1/2 pulg), respectivamente. El maquinado de los discos se realiza en un torno convencional de la marca VICTOR, modelo 1640, tal como se presenta en la Fig. 2.3.



Fig. 2.3. Torno convencional marca VICTOR.

En la Fig. 2.4 se presentan imágenes el proceso de maquinado de los discos y la espiga. Este inicia con un cilindrado para reducir el diámetro de 50.80 a 50 mm (ver Fig. 2.4a). Luego, se realizan cortes sobredimensionados a 15 mm de espesor usando una sierra industrial (ver Fig. 2.4b). Posteriormente, en el torno se refrentan ambas caras del disco (ver Fig. 2.4c) y se perfora un agujero de 4.36 mm (11/64 pulg) de diámetro a través del disco con una broca (ver Fig. 2.4d). Después, se lleva a cabo proceso de rectificado en ambas caras del disco para mantener estas paralelas (ver Fig. 2.4e). Una vez

terminados, los discos se sumergen en un recipiente con aceite para evitar la oxidación. Para las espigas de acero SAE O1, se cortan de una pieza con el diámetro hecho de fábrica de 4mm por lo cual solo se cortan y se refrentan a 1 pulg de longitud con un rostro maquinado de forma semiesférica. En la Fig. 2.4f se presenta espigas en proceso de conformación.

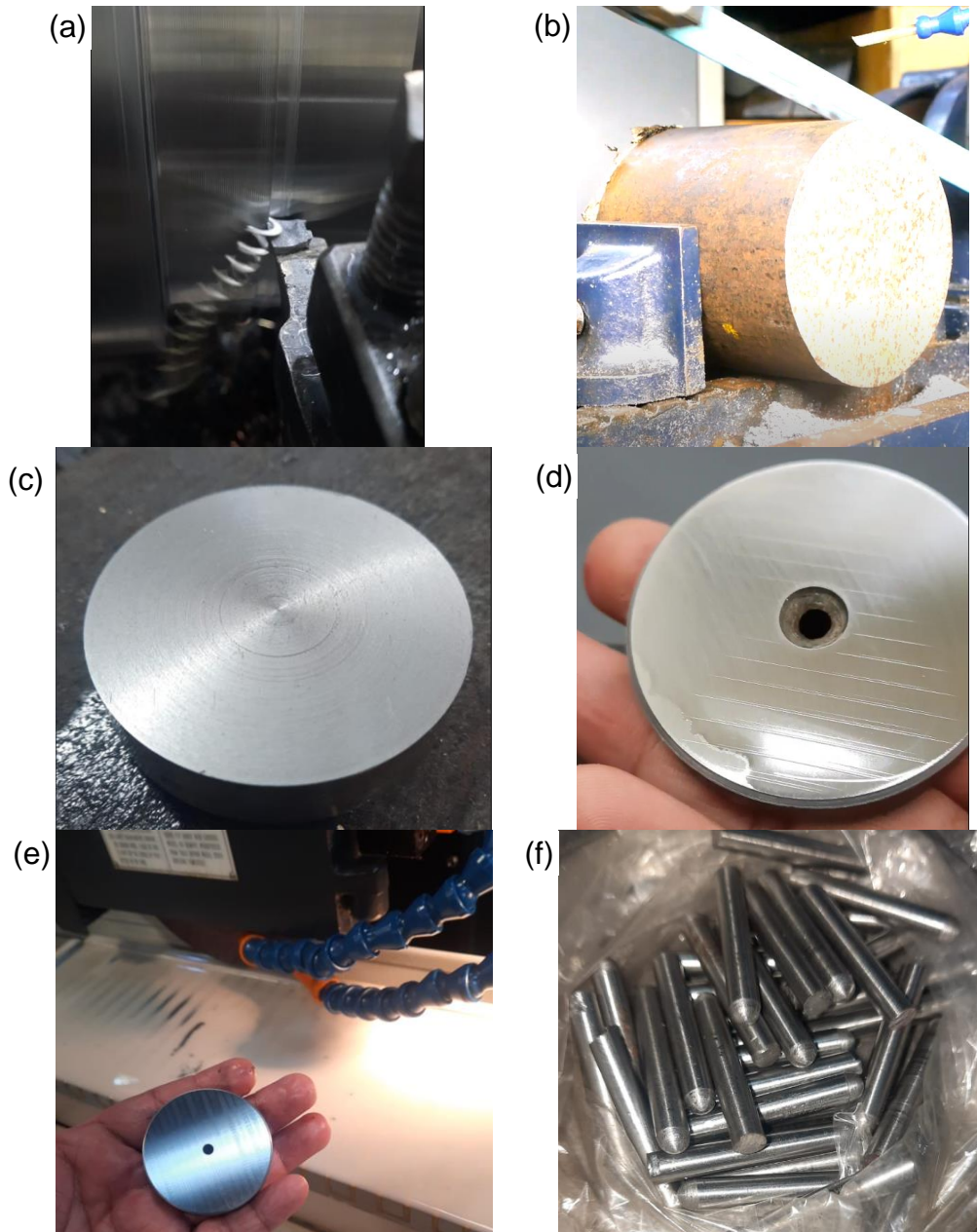


Fig. 2.4 Pasos del maquinado de los especímenes: a) Cilindrado; b) Corte; c) Refrentado; d) taladrado; y e) rectificado.

2.4. DISEÑO DE LA CAJA PARA CEMENTACIÓN

El diseño de la caja para el proceso de cementación se basa en los hallazgos de Artiga, Hernández y Mezquita (2002), cuyos resultados se detallarán en la sección 2.5. Según dicha investigación, la distancia ideal para realizar el tratamiento termoquímico de cementación es de 7.50 mm entre los discos. Considerando esta distancia óptima y las dimensiones de los discos, se formuló una disposición de los discos que estarán en el interior de la caja; las medidas del interior de la caja y la disposición de los discos se presentan en la Fig. 2.5 [24].

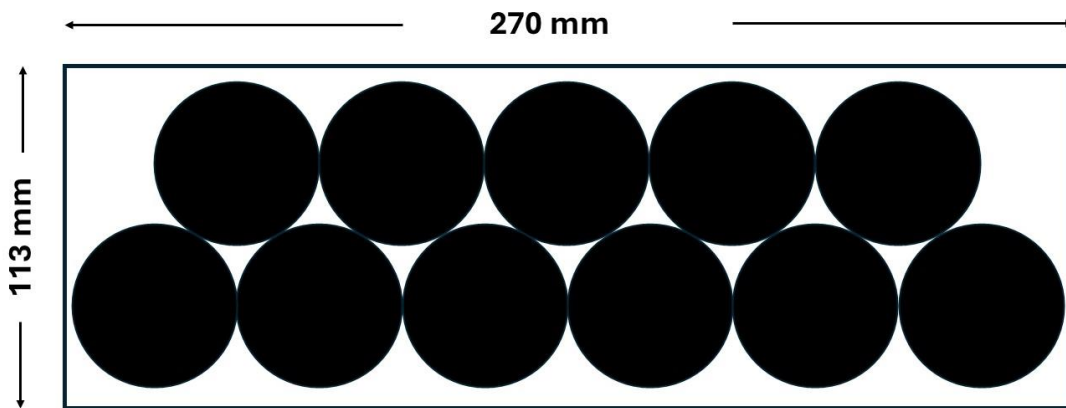


Fig. 2.5. Vista de planta de la caja de cementación. Cotas en mm.

En la Fig. 2.5 se presenta una vista en planta de la caja de cementación. En la parte trasera de la caja, se colocan 11 discos según la disposición indicada. Estos discos serán cubiertos con la mezcla carburante (descrita en la sección 2.5.1), formando una capa de 7.50 mm de espesor, que es la distancia entre caras recomendada para un tratamiento óptimo. Una vez alcanzado el espesor deseado, se colocarán los otros 11 discos en la misma configuración que se presenta en la Fig. 2.5 [24].

Dado que la caja para cementación se debe sellar herméticamente, se incorporó un canal alrededor de su contorno para que el espacio entre la tapa y la caja pueda ser sellado con barro. En la Fig. 2.6 se presenta el diseño externo de la caja y de su tapa.

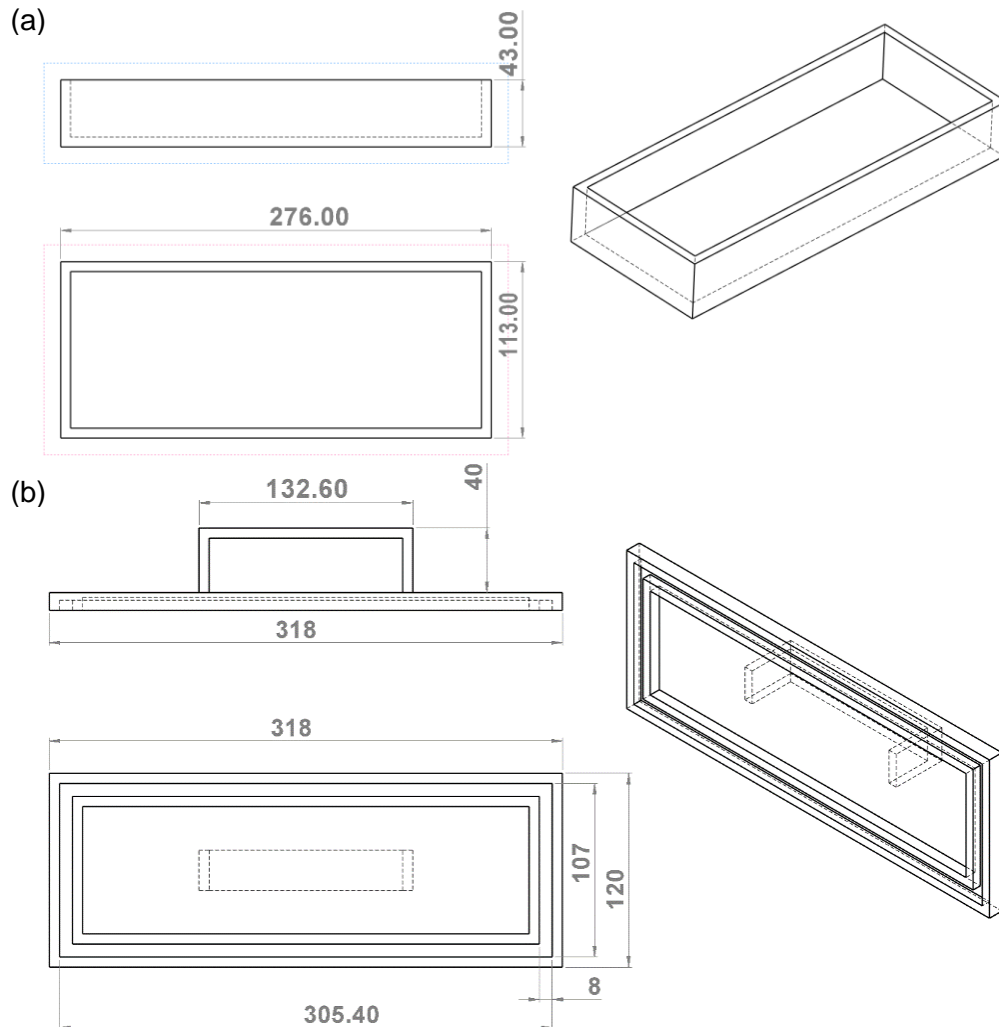


Fig. 2.6. Dimensiones externas de la caja de cementación fabricada en lámina de espesor 6.35 mm con su respectiva tapadera: a) Caja; y b) tapadera. Cotas en mm.

2.5. TRATAMIENTO TERMOQUÍMICO DE CEMENTACIÓN

Con base a los resultados del trabajo de Artiga, Hernández & Mezquita (2002), el tratamiento termoquímico se realizó para 22 discos con una mezcla cementante de proporción de 80:20, es decir 80% en peso de la carga será de carbón vegetal y el otro 20% en peso de la carga será del carbonato de bario, el tiempo del tratamiento termoquímico fue de 8 h el cual corresponde a la proporción de mezcla cementante seleccionada, así mismo la distancia de separación entre discos fue de 7.5 mm, con esto se espera obtener un espesor de capa cementada de alrededor de 0.98 mm [29].

2.5.1. LIJADO PREVIO AL TRATAMIENTO TERMOQUÍMICO DE CEMENTACIÓN

Para obtener resultados más precisos en el espesor de la capa cementada es necesario lijar los especímenes antes de la cementación. Esto evita que, después del tratamiento termoquímico y post-tratamiento térmico, el lijado previo al ensayo de desgaste reduzca el espesor de la capa cementada. Por ello, el proceso de lijado se debe iniciar desde las lijas 240, 320, 400 hasta la lija 600, para luego continuar con las lijas 1,000 y 1,200.

2.5.2. LIMPIEZA DE LOS DISCOS

Previo a la cementación, es fundamental eliminar cualquier impureza en la superficie de las piezas. El proceso inicia con un lavado con agua y jabón para remover los residuos del aceite en el que estuvieron almacenadas. Luego los especímenes se secan con aire caliente para eliminar la humedad. Posteriormente se realiza un lavado con una solución de soda cáustica al 5%, en la cual se sumergen durante 5 min. Finalmente, los discos se retiran y se secan nuevamente con aire caliente [29].

2.5.3. PREPARACIÓN DE LA MEZCLA CARBURANTE

En la Sección 2.5 se determinó que la proporción en peso de la mezcla carburante óptima es la 80:20. La obtención del carbón vegetal proveniente del bálsamo requiere un proceso previo en el que la madera del bálsamo se quema hasta obtener trozos de gran tamaño. Antes que la combustión sea excesiva, el carbón se apaga con agua, luego se tritura y tamiza hasta obtener partículas entre 3 y 6 mm de diámetro (ver Fig. 2.7). Posteriormente el carbón se seca a 150 °C por 2 horas y se deja enfriar a temperatura ambiente para evitar que la humedad afecte el tratamiento termoquímico. Para la obtención de los pesos del carbón como del activador, se inicia con la medición del volumen de la caja de cementada la cual es de 1429.12 cm³, el volumen de cada disco

es de 19.05 cm^3 y para 22 discos el volumen es de 419 cm^3 , la diferencia entre el volumen de la caja y el volumen de los discos es el volumen del carbón el cual es de 1010.12 cm^3 . Al pesar esta cantidad de carbón el resultado es de 343 g la cual corresponde al 80%, mediante una regla de 3 se obtiene el otro 20% correspondiente al activador lo cual resulta en 85.75 g [29].

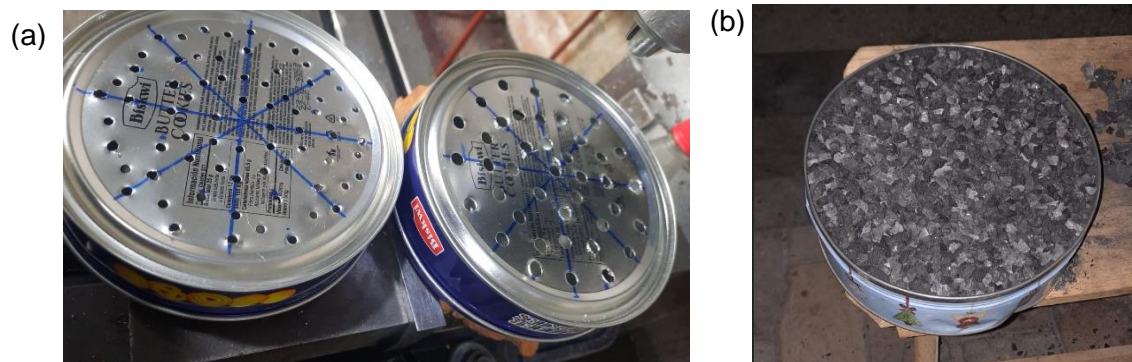


Fig. 2.7. Tamizado del Carbón vegetal de bálsamo: a) Tamices; y b) Carbón vegetal.

2.5.4. DISTRIBUCIÓN DE LOS DISCOS DENTRO DE LA CAJA

El espaciamiento y distribución son óptimas cuando se utiliza una distancia de 7.5 mm entre discos para condiciones de 8 h de cementación con una mezcla 80:20, el procedimiento es colocar una capa de 7.5 mm de mezcla carburante luego los discos, posteriormente otra capa de mezcla carburante y luego los discos restantes. Finalmente, se coloca una última capa más de mezcla carburante. Es importante que cada capa de mezcla debe ser debidamente compactada para utilizar adecuadamente la caja de cementación. Posteriormente, la caja se sella con su tapadera y se coloca arena alrededor para garantizar que el interior de la caja quede herméticamente cerrado. En la Fig. 2.8 se presenta el arreglo final en la caja para la cementación.

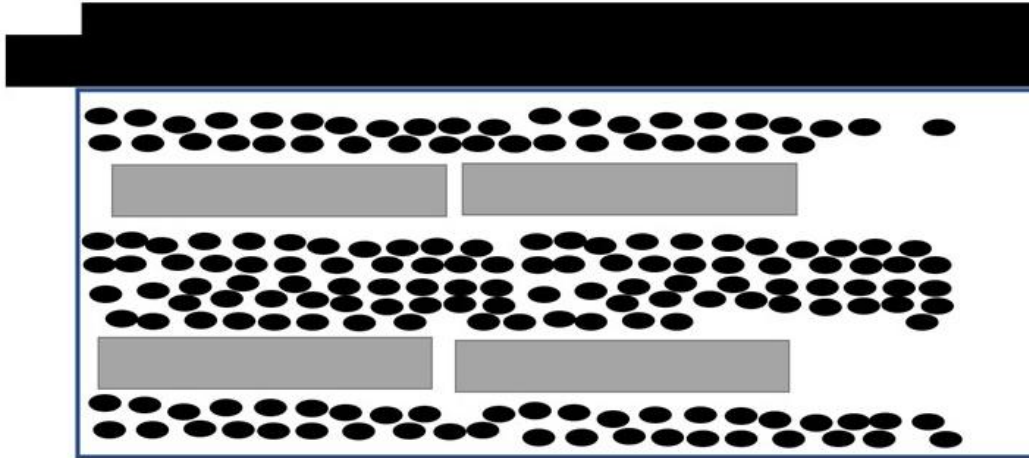


Fig. 2.8. Esquema de los discos y el arreglo con la mezcla cementante.

2.5.5. TRATAMIENTO TERMOQUÍMICO DE CEMENTACIÓN DE LOS DISCOS

La caja de cementación una vez preparada y sellada se coloca en el centro de la cámara de la carga a una temperatura de 900 °C, esto se mantiene por un lapso de tiempo de 8 h [29].

2.5.6. ETAPA POSTERIOR DEL PROCESO DE CEMENTACIÓN

En esta etapa es necesario dejar que la caja de cementación llegue a la temperatura ambiente de esta manera logrando un enfriamiento total.

2.6. POST-TRATAMIENTO TÉRMICO DE LOS DISCOS

El post-tratamiento térmico consiste en un proceso de temple y un revenido, esto implica retirar los discos de la caja de cementación para luego colocarlas en una cámara con gas argón y llevarlas a una temperatura de 875 °C, el enfriamiento abrupto se hace en aceite, posteriormente los discos se vuelven a colocar en el horno y se llevan a una

temperatura de 200 °C y se mantienen en esta condición por 20 min luego se enfrían hasta la temperatura ambiente [4].

Ambos procedimientos se llevan a cabo en la caja de gas inerte, con el fin de que los discos no se oxiden durante el post-tratamiento. En las Fig. 2.9a) se presenta la cámara en medio del tratamiento con los discos en su interior a su vez conectada al gas argón, en este procedimiento como se presenta en la imagen la cama se rodea de fibra cerámica, de tal manera que la pérdida de calor suministrado por el horno sea significativamente menor. En la Fig. 2.9b) se presenta los arreglos de parejas en las que se hizo el temple por la capacidad de la cámara de gas inerte.

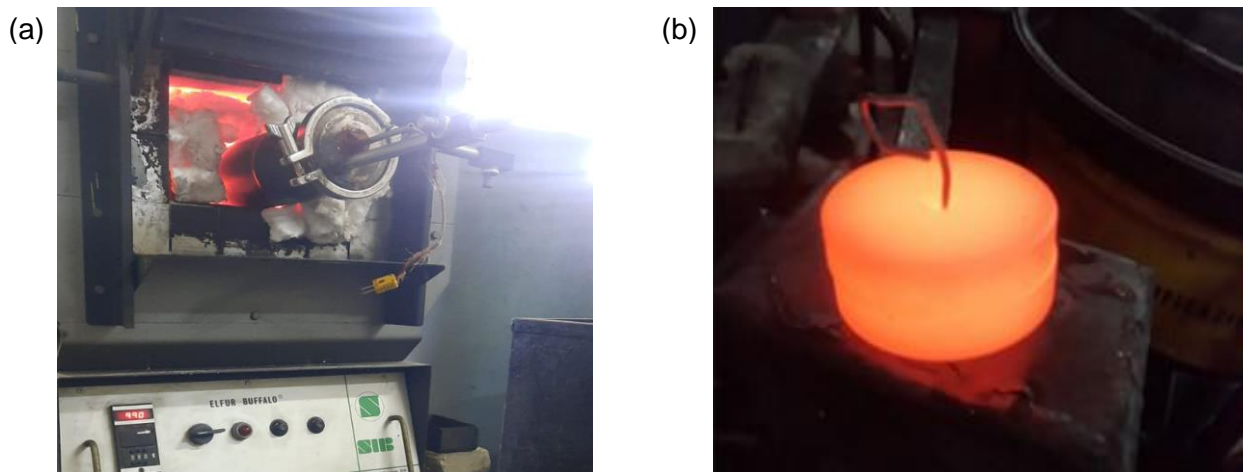


Fig. 2.9. Post-tratamiento térmico: a) Cámara de gas inerte; y b) discos en proceso de temple

2.7. TRATAMIENTO TÉRMICO DE LAS ESPIGAS

Después de maquinar y limpiar las espigas de acero SAE O1, se sometieron al tratamiento térmico de temple y revenido. En la Fig. 2.10 se presenta la curva de temperatura vs tiempo, correspondiente al tratamiento térmico de las espigas [4].

El tratamiento comenzó con la preparación del horno, que consistió en purgar la cámara con argón y calentar el horno con incrementos de temperatura de 50 °C cada 15 min hasta alcanzar los 800 °C [29].

Para facilitar el proceso de temple, se empaquetaron las espigas en 5 grupos de 7 espigas, y un grupo de 3 espigas, sumando un total de 38 espigas sometidas al tratamiento térmico de temple y revenido (ver Figs. 2.11 y 2.12).

La temperatura de austenización corresponde a 800 °C (ver Fig. 2.13) y de acuerdo con la relación de tiempos de mantenimiento para una sección de 4 mm es de 20 min a la temperatura dada, posteriormente el temple se realizó en aceite [29].

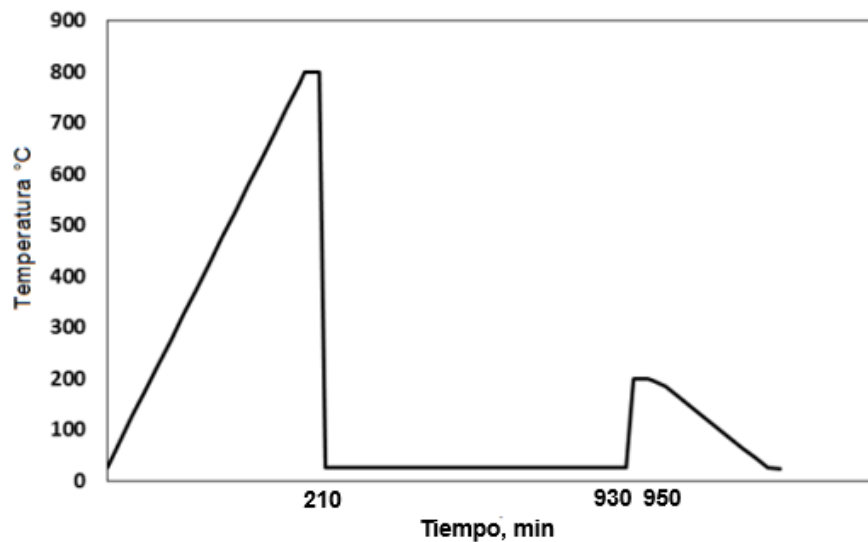


Fig. 2.10. Curva de variación temperatura vs tiempo para el tratamiento térmico de temple y revenido de las espigas de acero SAE O1.

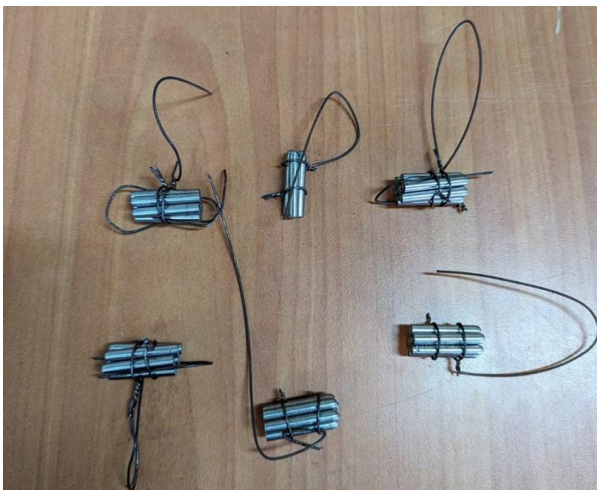


Fig. 2.11. Grupos de espigas empaquetadas antes del tratamiento térmico de temple.



Fig. 2.12. Cilindro de argón y horno utilizados para los tratamientos térmicos.

El proceso de revenido comenzó cuando el horno alcanzó los 100 °C, momento en el cual se introdujeron las espigas en la cámara del horno hasta alcanzar la temperatura de 200 °C (ver Fig. 2.14). El tiempo de mantenimiento a dicha temperatura, fue de 20 min. Una vez pasado dicho tiempo las espigas se extrajeron de la cámara del horno para un enfriamiento al aire libre. Posterior al tratamiento térmico, los especímenes se recubrieron con aceite y se guardan para su uso experimental.



Fig. 2.13. Temperatura de temple para las espigas de acero SAE O1.



Fig. 2.14. Temperatura de revenido para las espigas de acero SAE O1.

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

Tanto los discos como las espigas se someten a un proceso previo a la ejecución del ensayo de desgaste tipo espiga sobre disco, dicha preparación consiste en la limpieza de cada probeta.

Para los discos el proceso de limpieza comienza con un lavado con agua y jabón líquido para eliminar los residuos del aceite en el que han estado almacenados después del maquinado.

Después del proceso de limpieza se realiza un proceso de lijado manual de las superficies que estarán en contacto durante la realización del ensayo, para los discos se

realizó el lijado desde una hoja basta de SiC número 180, luego se utilizan hojas menos bastas (220, 320 y 400), hasta llegar a las más finas (500, 600, 1,000 y 1,200), en la Fig. 2.15 se presenta la superficie de los discos después del lijado [29].

Un proceso similar se realiza con el extremo semiesférico de las espigas; para las espigas se utilizarán los números de lija 600, 1,000 y 1,200.

Luego los discos se secan utilizando aire caliente, para asegurar la remoción de la humedad.

Posteriormente, los discos se introducen en aceite y se guardan en bolsas plásticas con cierre hermético para protegerlos de la corrosión.



Fig. 2.15. Superficie lijada de los discos.

Para continuar con el proceso se realiza una limpieza ultrasónica con acetona, para esto se necesitó de una cámara de baño ultrasónico marca BRANSON modelo M3800H (ver Fig. 2.16) en la cual se introdujeron los discos y las espigas durante 2 min.

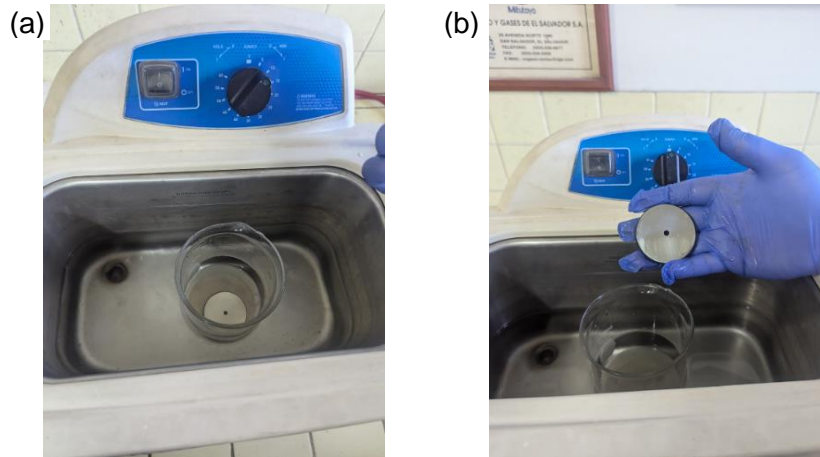


Fig. 2.16. Limpieza de discos en cámara ultrasónica marca BRANSON: a) Inicio de limpieza; y b) Final de limpieza.

2.9. ENSAYO DE DESGASTE TIPO ESPIGA SOBRE DISCO

Los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco se llevaron a cabo en un módulo GUNT, modelo 70 TM 260.3, el cual se utiliza como complemento al módulo básico para estudios tribológicos de la misma marca, modelo TM 260, los cuales se encuentran ubicados en el laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica mostrado en la Fig. 2.17.

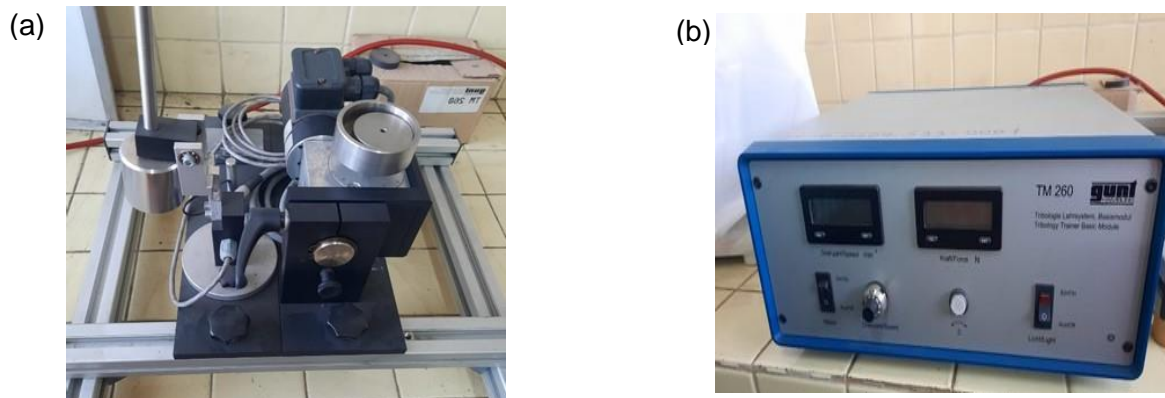


Fig. 2.17. Módulo para ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco marca GUNT, TM 260.3.

El módulo para ensayos tipo espiga sobre disco permite colocar una espiga con una superficie de contacto perpendicular a un disco, el cual se fija a un vaso mediante un perno. A través del árbol de accionamiento del módulo el disco gira produciendo un

movimiento de deslizamiento entre las dos superficies en contacto de los especímenes cuya trayectoria es circular sobre la superficie del disco. Para los ensayos se utilizan espigas con punta semiesférica.

La espiga se coloca contra el disco y se le aplica una carga constante por medio de un brazo en el cual se le agregan pesos. La Fig. 2.18 se presenta un esquema del módulo para ensayos tipo espiga sobre disco en el que se enumeran sus componentes más importantes.

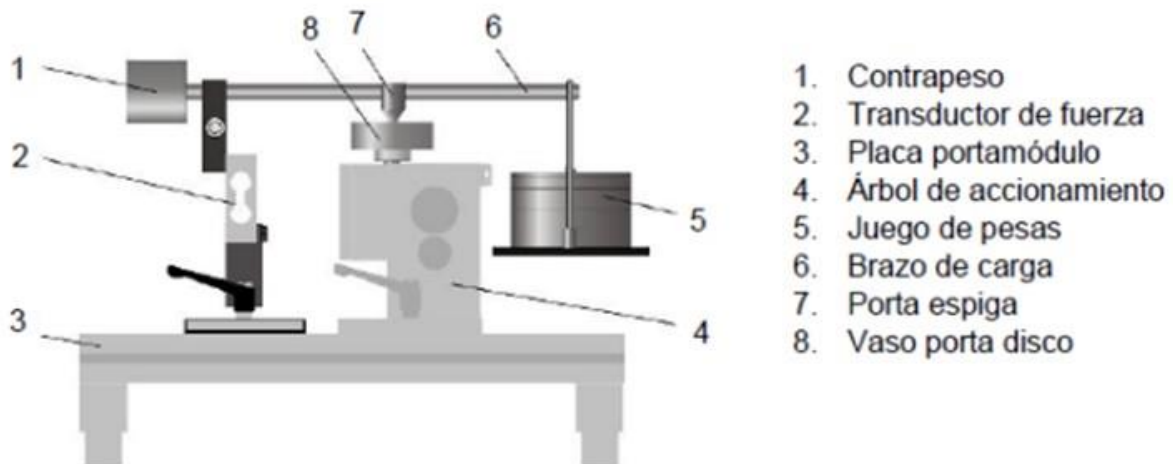


Fig. 2.18. Esquema de módulo para ensayos tipo espiga sobre disco con sus principales componentes.

Los resultados de desgaste se reportan como la pérdida de masa en gramos tanto para la espiga y el disco respectivamente. La cantidad de desgaste es determinada pesando en una balanza analítica las espigas y los discos antes y después de la prueba (ver Fig. 2.19).

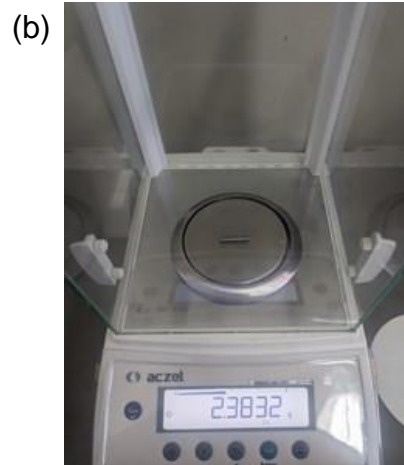


Fig. 2.19. Pesaje en una balanza semi-analítica disco y espiga: a) Peso final de disco; y b) Peso final de espiga.

Los resultados de desgaste normalmente son obtenidos realizando los ensayos para una distancia de deslizamiento, carga y velocidad seleccionada, en la Tabla 2.1 se presentan las diferentes variables del experimento para las condiciones de los discos cementados y no cementados respectivamente, se realizarán 3 experimentos por cada una de las 12 variantes [30].

Tabla 2.1. Condiciones de material y variables bajo las que se realizan los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco.

Condición	Variables		
	Velocidad, m/s	Distancia de deslizamiento, m	Carga, N
Acero SAE 3115 sin cementado	0.1	1,000	10
			15
			20
		2,000	10
			15
			20
Acero SAE 3115 cementado	0.1	1,000	10
			15
			20
		2,000	10
			15
			20

La velocidad a la que se realizaron los experimentos corresponde a 0.1 m/s, la cual es una velocidad recomendada para realizar los ensayos tipo espiga sobre disco [30].

El módulo con que se dispone para realizar dichos ensayos permite ajustar con el potenciómetro un número de revoluciones de salida entre 0 y 200 rpm, por lo tanto, es necesario convertir la velocidad lineal a velocidad angular para determinar el número de revoluciones con el que se realizarán los experimentos. Para convertir la velocidad lineal a velocidad angular se ocupa la Ec. 2.1.

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

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

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

Por lo tanto, sustituyendo en la Ec. 2.1 se obtiene un valor de 4.80 rad/s, convirtiéndolo a revoluciones por minuto se tienen 45.91 rpm, los cuales se aproximan a 46 rpm. Debido a que el módulo para ensayos tipo espiga sobre disco no puede determinar la distancia de deslizamiento directamente, durante la ejecución de los experimentos se llevará un registro de tiempos, en lugar de distancias.

Para obtener el tiempo equivalente a una determinada distancia se procedió a dividir la distancia de deslizamiento entre la velocidad lineal, así como se indica en la Ec. 2.2.

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

donde: t es el tiempo en s.
 v es la velocidad de deslizamiento en m/s.
 s es la distancia de deslizamiento en metros.

Así, debido a que la velocidad de deslizamiento es la misma para todos los experimentos (0.1 m/s) y se trabaja con dos distancias de deslizamiento diferentes, el tiempo requerido tanto para 1,000 y 2,000 m es de 10,000 y 20,000 s respectivamente, transformándolos a h corresponden a 2.77 y 5.55 h, respectivamente.

Una vez establecidas las variables de tiempo y cargas se procedió a realizar los ensayos. Después de encender la caja de mando y el motor de esta, se colocan tanto el disco como la espiga en sus respectivos soportes y se baja el brazo de carga de manera que la espiga se apoye en el disco, luego se colocan en el porta carga la combinación de pesas correspondiente a la carga bajo la que se realizará el experimento según la Tabla 2.1.

Finalmente se ajusta el número de revoluciones en la caja de mando y se lee el valor de la fuerza de fricción. Las lecturas se realizan cada 2 min con el objetivo de generar la curva para el coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento. Para determinar el coeficiente de fricción se utiliza la Ec. 2.3.

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

donde: μ es el coeficiente de fricción,

F_f es la fuerza de fricción medida en N, y

F es la carga seleccionada para el experimento en N.

2.10. DETERMINACIÓN DE DUREZA

Para la determinación de dureza superficial de las capas cementadas, se utiliza el ensayo de microdureza Vickers, un método recomendado para la determinación de dureza de materiales endurecidos o templados y revenidos. Para la realización de dicho ensayo se utiliza un durómetro marca INNOVATEST perteneciente a los Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de esta Universidad (ver Fig. 2.20).

La dureza del material se lee directamente del dial indicador de la máquina, cuya escala se basa en el incremento de profundidad del penetrador. Para determinar el valor

de dureza se aplica una carga total de 4 kg_f y se utiliza un penetrador de diamante y de geometría piramidal (ver Fig. 2.21). Así, se realizan 4 tomas de dureza aproximada mente a 0.5, 1, 1.5 y 2 mm desde el borde hacia el interior de la probeta, luego que el durómetro ha realizado la indentación, se desliza el porta muestras a la izquierda a la cámara del durómetro, donde se miden las esquinas de la indentación y luego el programa provee el resultado de la dureza, esto se realizó para las 4 medidas.



Fig. 2.20. Durómetro marca INNOVATEST.

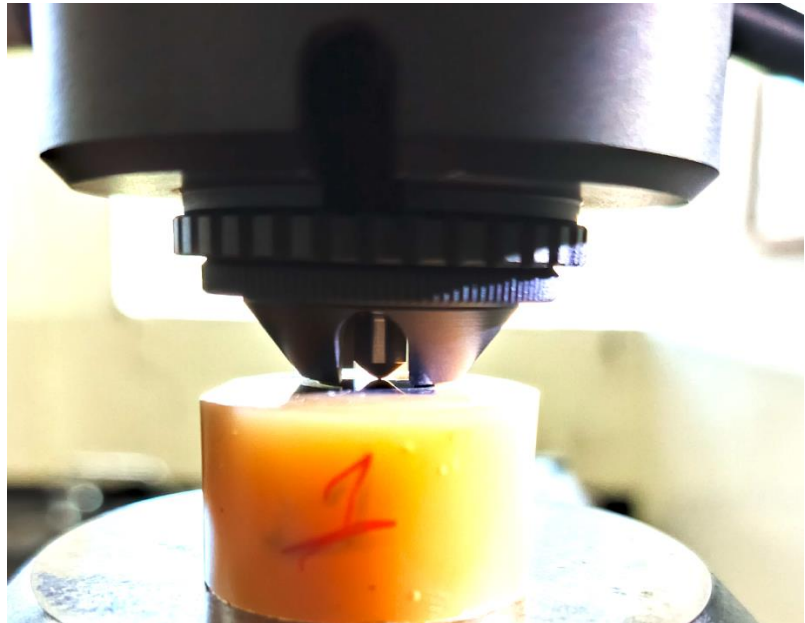


Fig. 2.21. Penetrador de diamante y de geometría cónica.

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

2.11. MEDICIÓN DEL ESPESOR DE LA CAPA CEMENTADA

Para medir del espesor de la capa cementada se utilizó un microscopio óptico, por lo tanto, es necesario preparar una muestra metalográfica de uno de los especímenes

cementados. En primera instancia se realiza un corte a uno de los especímenes ensayados tal como se presenta en la Fig. 2.22.

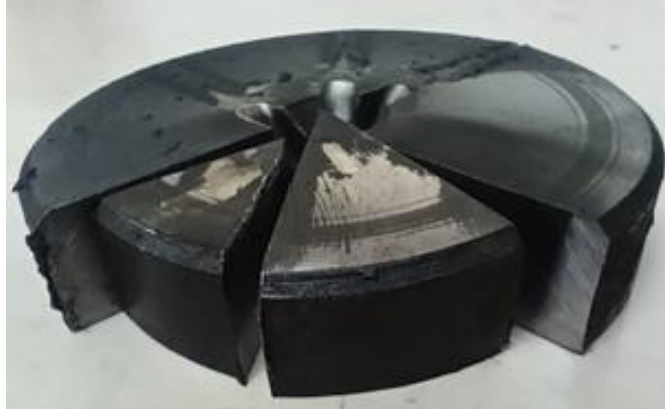


Fig. 2.22. Corte de la muestra metalográfica a preparar para la medición del espesor de la capa cementada.

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

Posterior al embutido, se procedió a realizar un pulido de la superficie a observar, primeramente, se realiza un desbaste mecánico utilizando lijas de agua de los números 100, 200, 320, 400, 500 y 600. Posteriormente se realiza un pulido grueso utilizan lijas número 1,000, 1,200 y 1,500. Para realizar el pulido final (pulido de espejo) se utiliza la máquina pulidora (ver Fig. 2.23), para dicha operación se deposita alúmina (Al_2O_3) sobre un paño afelpado montado sobre un plato giratorio en la máquina.



Fig. 2.23. Máquina pulidora para realizar el pulido de espejo.

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

Posteriormente se utiliza un microscopio óptico (ver Fig. 2.24) para poder observar la muestra a un aumento de 100x y medir directamente el espesor de la capa cementada.



Fig. 2.24. Microscopio óptico marca Leitz Metallovert.

Las imágenes se capturarán con una cámara Amscope y una computadora en conjunto con el microscopio, en la Fig. 2.25 se presentan los 3 equipos acoplados durante la toma de fotografías.

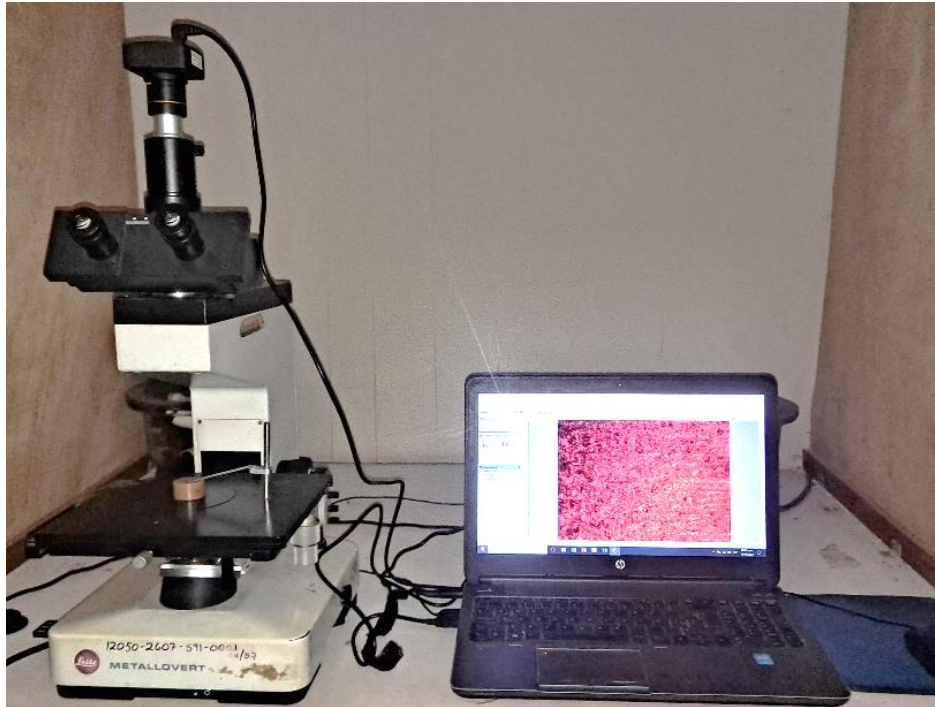


Fig. 2.25. Equipos utilizados para caracterizar la capa cementada.

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

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de los ensayos de desgaste y el análisis detallado de los resultados obtenidos durante esta investigación, el objetivo principal de este capítulo es exponer de manera clara y sistemática los resultados obtenidos de la investigación con base en los procedimientos experimentales seguidos y explicados en el capítulo 2, así como interpretar los datos recopilados para evaluar su validez y significado en el contexto del estudio de desgaste. Los ensayos realizados permiten verificar el mejoramiento y la factibilidad del tratamiento termoquímico aplicado y, a su vez, identificar posibles desviaciones, patrones o tendencias relevantes que puedan contribuir a una comprensión más profunda de los efectos al someter un acero a un proceso de cementación sólida.

A través de este análisis, se pretendió no solo demostrar la viabilidad y precisión de los métodos y parámetros empleados, sino también ofrecer una visión crítica de los resultados obtenidos, señalando tanto sus implicaciones como también las limitaciones inherentes al estudio. Además, se discuten posibles fuentes de error, las correlaciones encontradas y los análisis que derivan de los datos, lo cual proporciona una base sólida para las conclusiones finales de la investigación.

3.1. RESULTADOS DE LOS ESPESORES DE LA CAPA CEMENTADA

La medición de los espesores del proceso de cementación se realizó a partir de la selección de 2 discos de los 22 cementadas, de tal manera que de los niveles que se colocaron en la caja de cementación los cuales fueron 2, se escogió 1 disco de cada nivel, tal como se presenta en la Fig. 3.1, los discos seleccionados fueron la número 1 y 14.

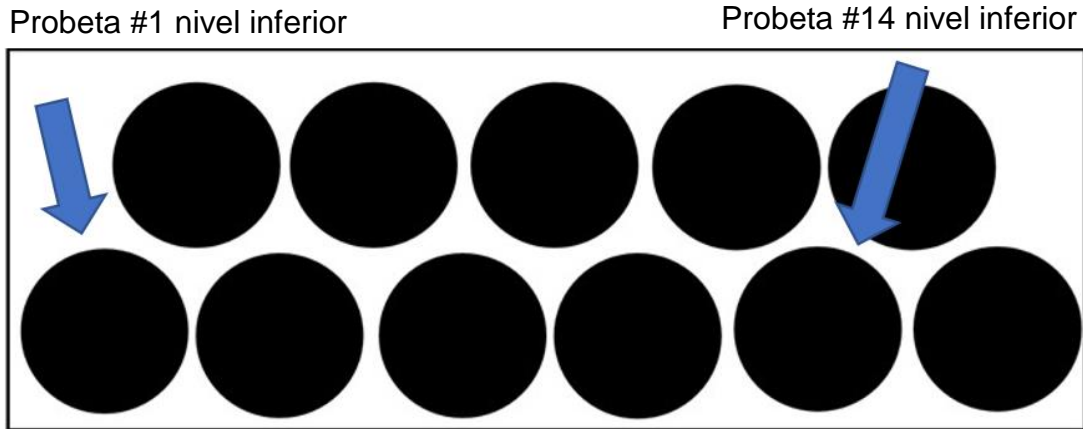


Fig. 3.1. Ubicación de los discos para medir espesores de la capa cementada.

En la Tabla 3.1 se presentan los espesores obtenidos de las cuatro mediciones realizadas a cada capa cementada, junto con el espesor promedio y la desviación estándar de cada muestra. Además, se indica el espesor promedio de la capa cementada obtenida en esta investigación. Las Figs. 3.2 y 3.3 se representan la secuencia de las mediciones 1, 2, 3 y 4 a un aumento de 100x del espesor de la capa cementada de las muestras. En la Fig. 3.4a y b se presentan fotografías a un aumento de 500x de unas mediciones de la muestra 1.

Tabla 3.1. Resultados de la medición de los espesores de la capa cementada de cada muestra, valores promedio y desviaciones estándar de las muestras y espesores de la capa del proceso.

Muestra	Medida	Espesor, mm	Espesor promedio del lote, mm	Desviación estándar, mm	Espesor promedio, m
1	1	1.433	1.459	0.060	1.532
	2	1.489			
	3	1.389			
	4	1.524			
2	1	1.582	1.606	0.055	
	2	1.589			
	3	1.687			
	4	1.566			

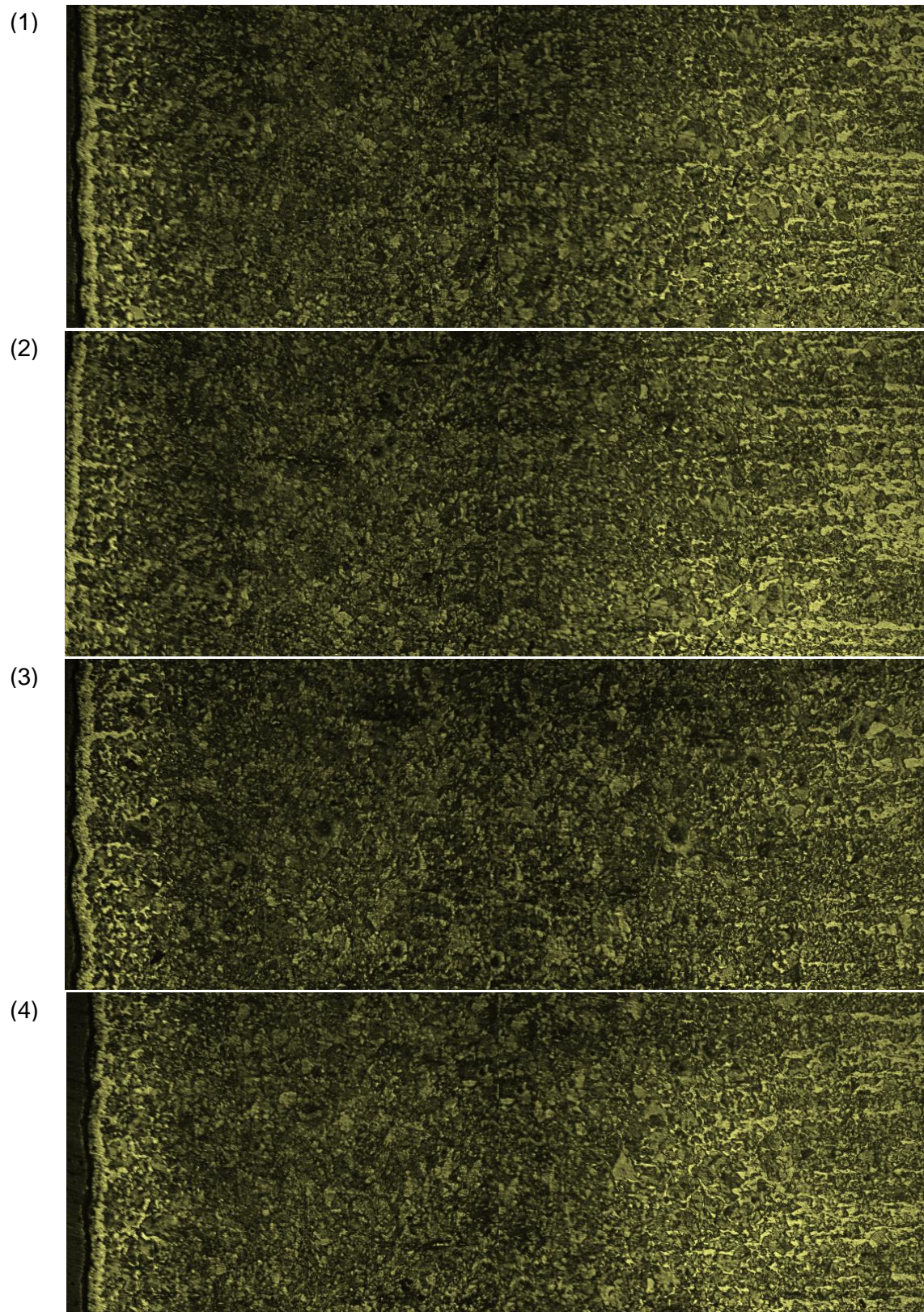


Fig. 3.2. Secuencias de las 4 mediciones del espesor de la capa cementada de la probeta 1.

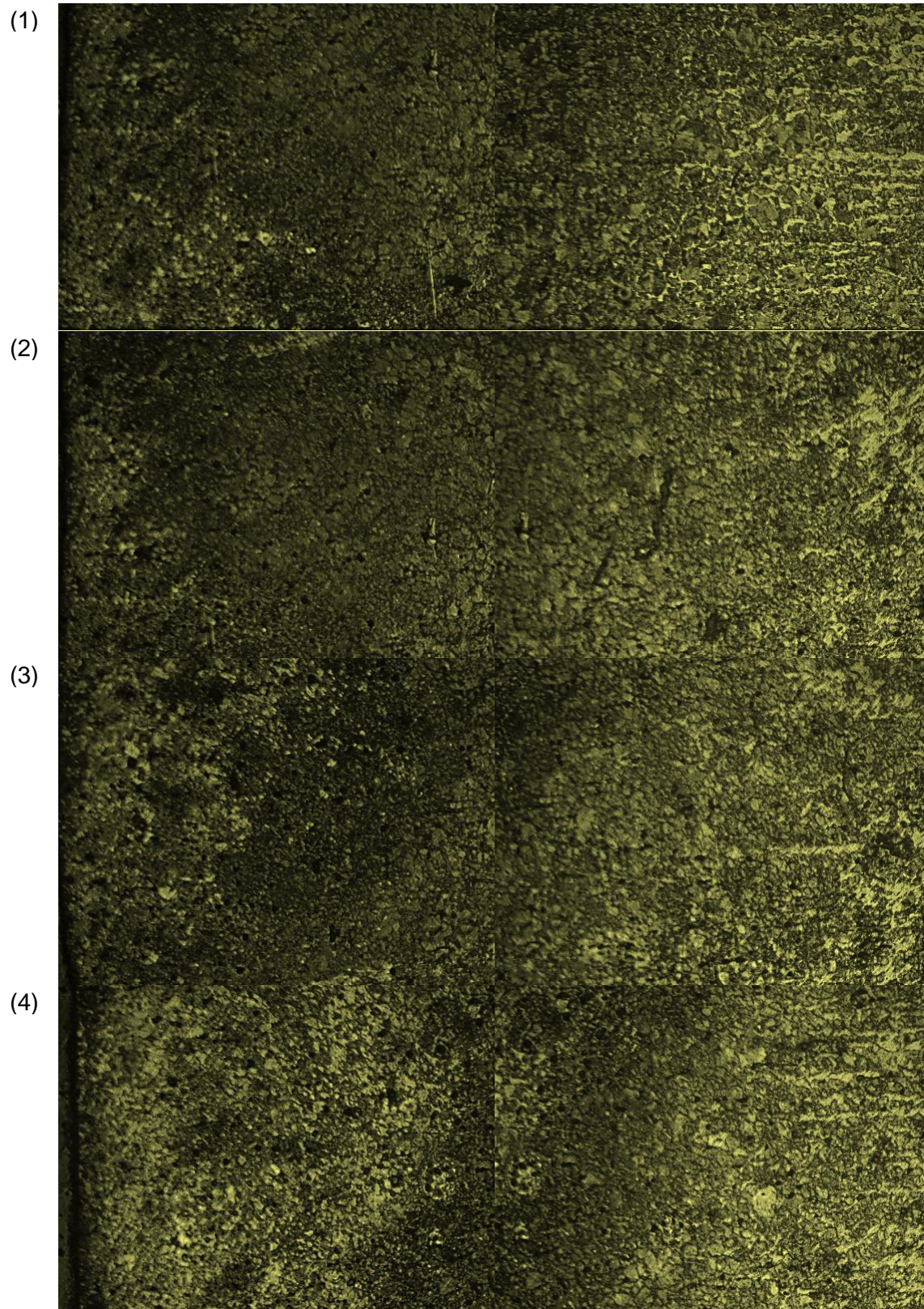


Fig. 3.3. Secuencias de las 4 mediciones del espesor de la capa cementada de la probeta 14.

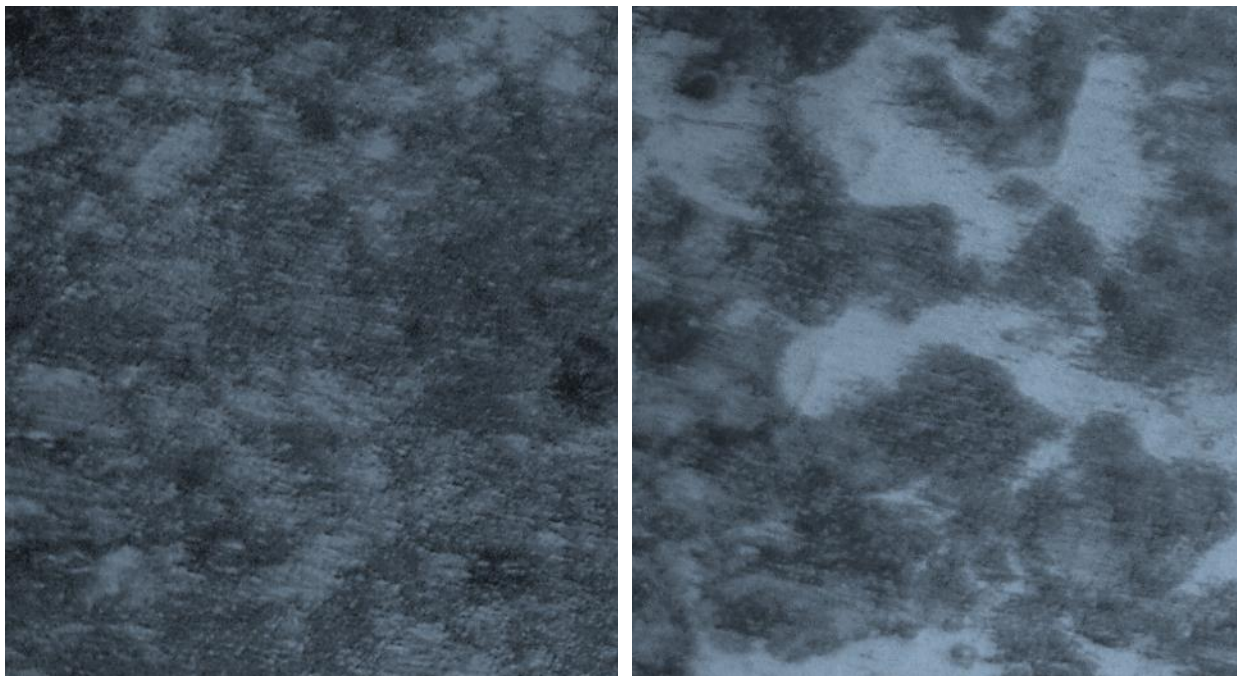


Fig. 3.4. Fotografía a un aumento de 500x en la zona de: a) la primera medición del borde del disco; y b) la primera medición del interior del disco.

3.2. DETERMINACIÓN DE LA DUREZA

Para determinar la dureza de las capas con cementación sólida seguidas de un post-tratamiento de temple y revenido, se produjeron partes embutidas de los discos que se utilizaron para estudiar el espesor de la capa cementada, es decir los discos 14, 7 y 15, provenientes de los niveles inferior y superior respectivamente. En la Tabla 3.2 se presentan los resultados de estas mediciones, la distancia del borde hacia la indentación, se presenta el valor en dureza Vickers, el equivalente en dureza Rockwell C, se encuentra la dureza promedio presentada por los discos embutidos y también se encuentra la desviación estándar de estos resultados de la medición. En la Fig. 3.5 se presenta el gráfico de microdureza Vickers versus distancia donde se presenta la tendencia del valor de ésta y como varía a medida que se adentró en el espesor del disco.

Además, en las Fig. 3.6. y 3.7 se presentan las fotografías de las indentaciones a un aumento de 100x y una fotografía de una indentación a 500x, correspondientes a las pruebas de dureza realizadas en las muestras de los discos 1 y 14.

Tabla 3.2. Valores de microdureza Vickers sobre discos de acero SAE 3115 con tratamiento termoquímico de cementación con post-tratamiento térmico de temple y revenido.

N° probeta	N° Medición	Distancia, mm	Valor HV	Valor HRC
1	1	0.46	406.2	41.4
	2	0.81	377.9	38.6
	3	1.84	318.7	32.1
	4	2.41	313.6	31.4
2	1	0.58	488.18	48.3
	2	1.1	428.46	43.5
	3	1.65	368.38	37.6
	4	2.13	322.47	32.5
3	1	0.45	446.17	45.0
	2	0.9	412.84	40.7
	3	1.56	379.27	38.7
	4	2.08	350.6	35.6

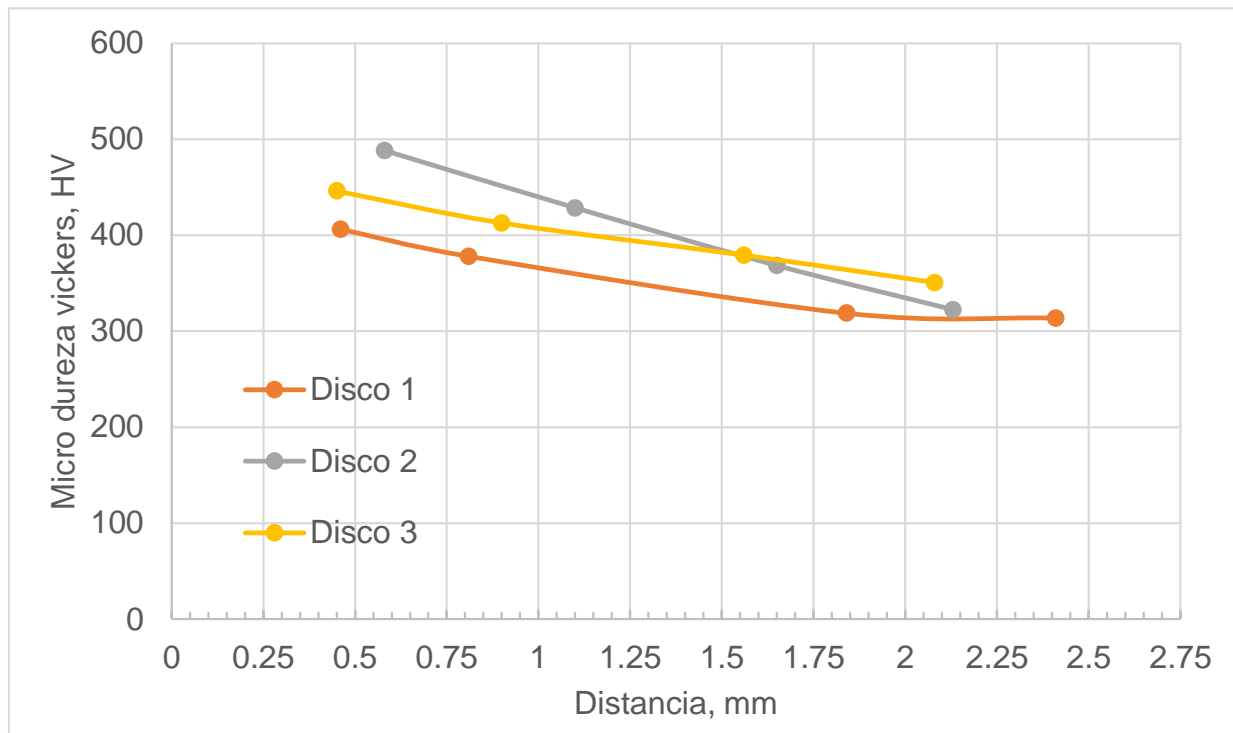


Fig. 3.5. Gráfico de la distribución de la microdureza encontrada en los discos.

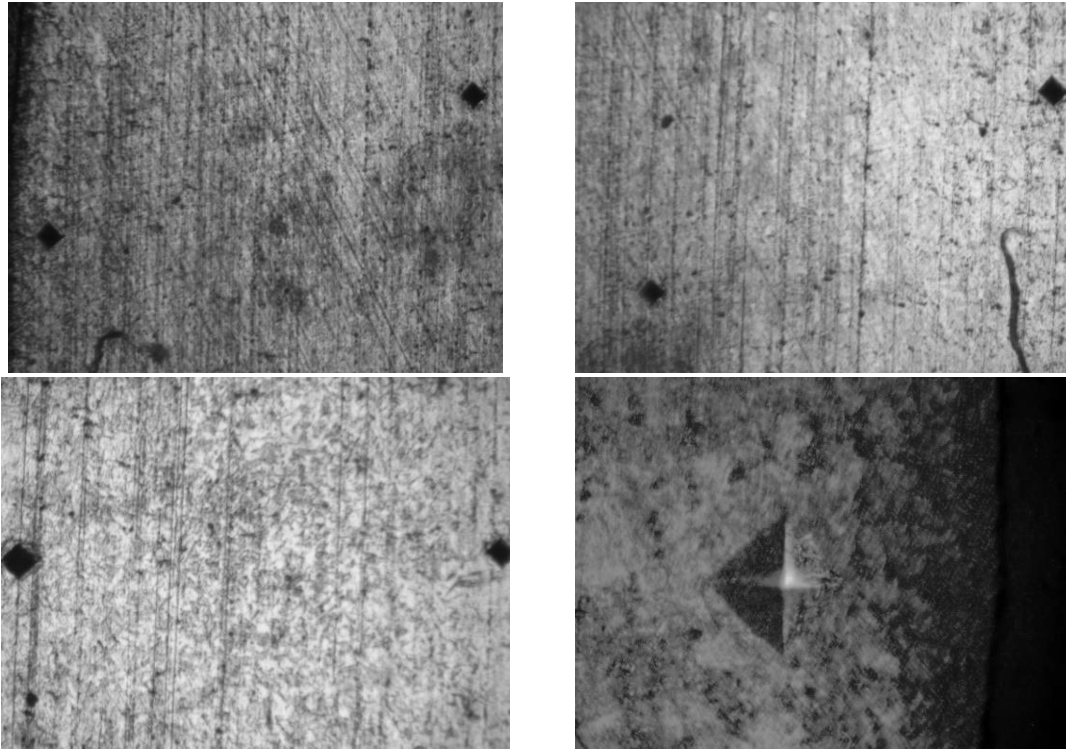


Fig. 3.6. Fotografía de las indentaciones de las pruebas de dureza en muestra del disco 1.

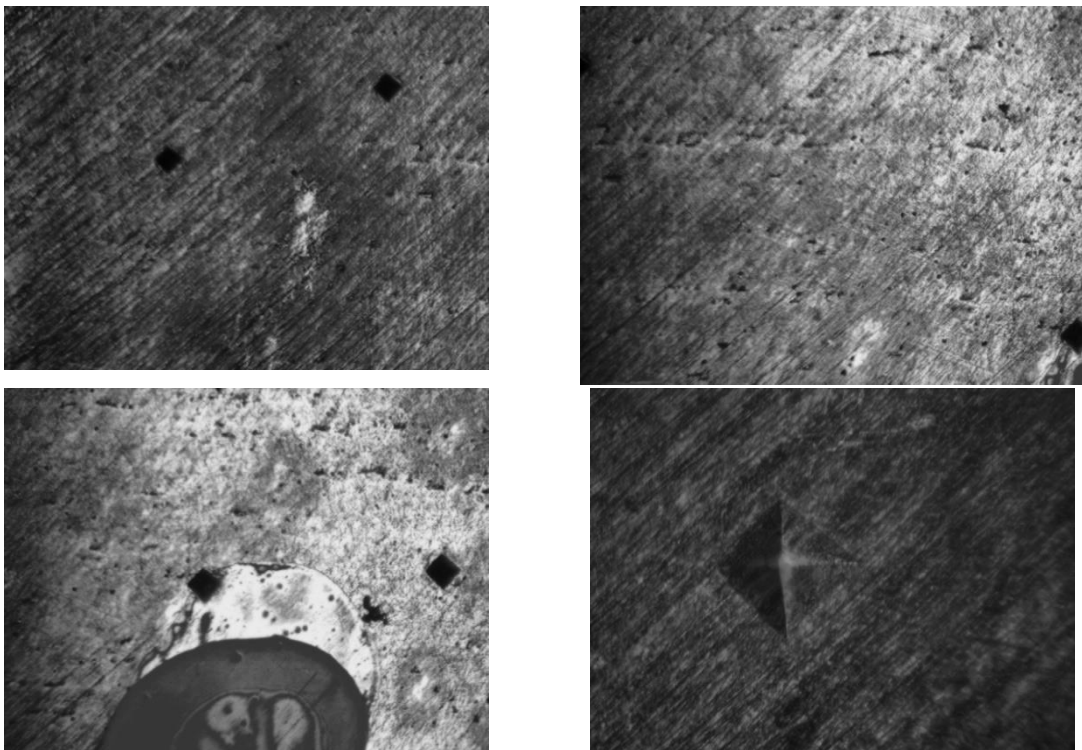


Fig. 3.7. Fotografía de las indentaciones de las pruebas de dureza en muestra del disco 14.

3.3. RESULTADO DE LOS ENSAYOS DE DESGASTE

En este apartado se presentan los resultados de los ensayos de desgaste de tipo espiga sobre disco, realizados en un total de 36 ensayos. De estos, 18 discos son de material base en estado recocido y los otros 18 discos con tratamiento termoquímico de cementación sólida con temple y revenido. Para ambos casos, se utilizaron espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas. Esta información contiene las curvas de coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento utilizada para las múltiples condiciones de ensayos. En las Tablas 3.3 y 3.4 se presentan los valores de pérdida de masa como resultado del ensayo de desgaste y en las Tablas 3.5 y 3.6 se encuentra la pérdida de masa de las espigas, En las Figs. 3.8 - 3.11 se presenta gráficamente la pérdida de masa en discos y espigas.

En las Figs. 3.12 - 3.23 se presentan las imágenes que representan a través de gráficos el comportamiento del coeficiente de fricción versus la distancia ensayada de todos los ensayos realizados en discos en estado de material base y en los discos con tratamiento termoquímico, estas imágenes contienen los 3 ensayos realizados para una misma carga y la distancia de deslizamiento, recordando que se combinó 3 cargas de 10, 15 y 20 N y dos distancias de deslizamiento que fueron 1,000 y 2,000 m. En los gráficos se presenta también los sufijos R y C que corresponden a los discos de metal base recocidos y los discos con tratamiento termoquímico.

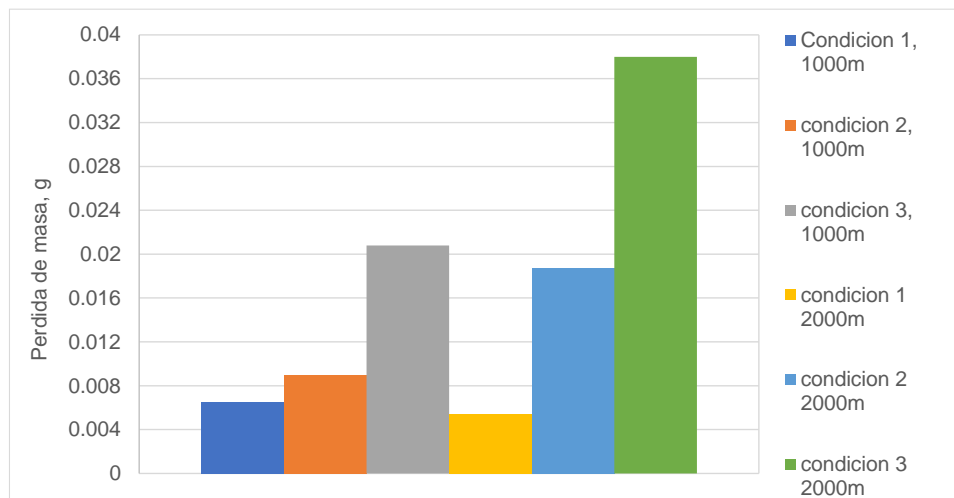


Fig. 3.8. Gráfico de la pérdida de masa en discos material base.

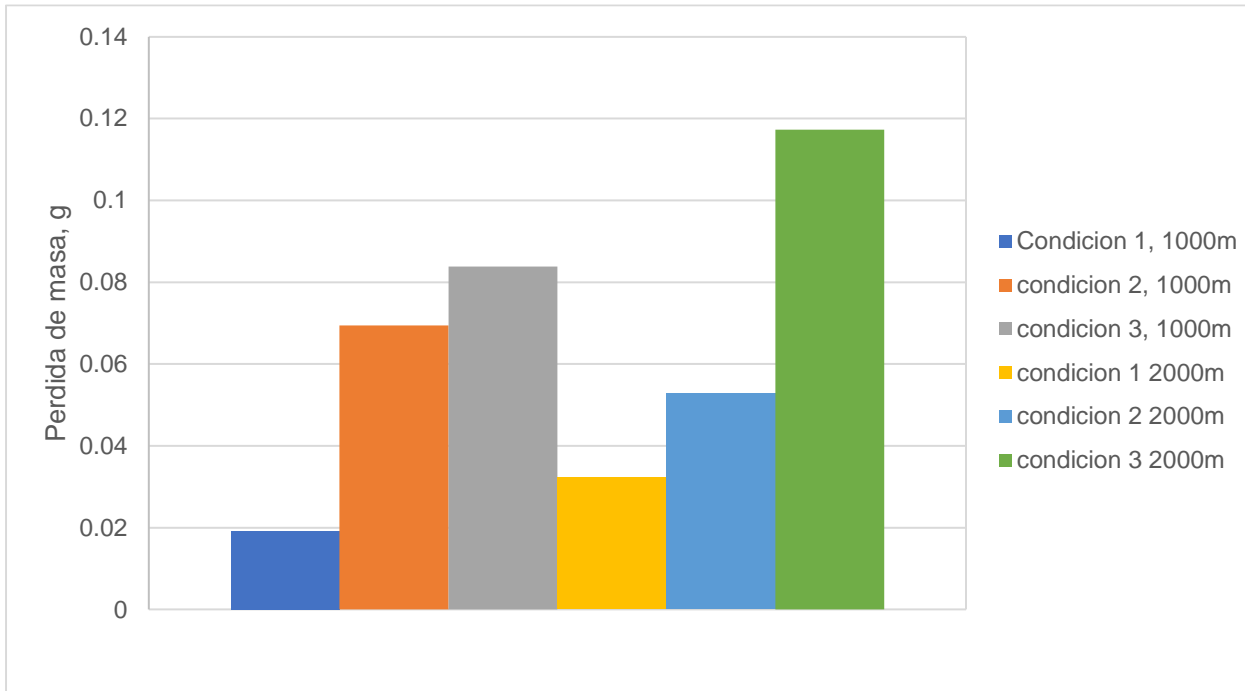


Fig. 3.9. Gráfico de la pérdida de masa promedio en discos cementados.

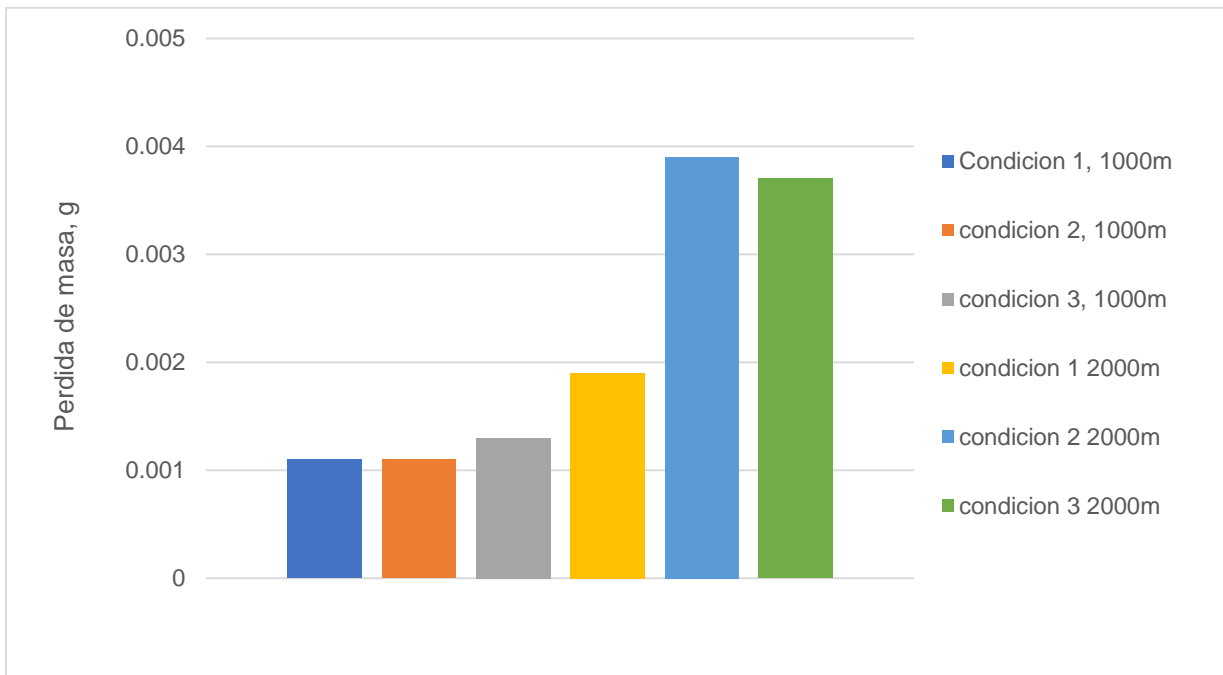


Fig. 3.10. Gráfico de la pérdida de masa promedio en espigas usadas en ensayos con discos de material base.

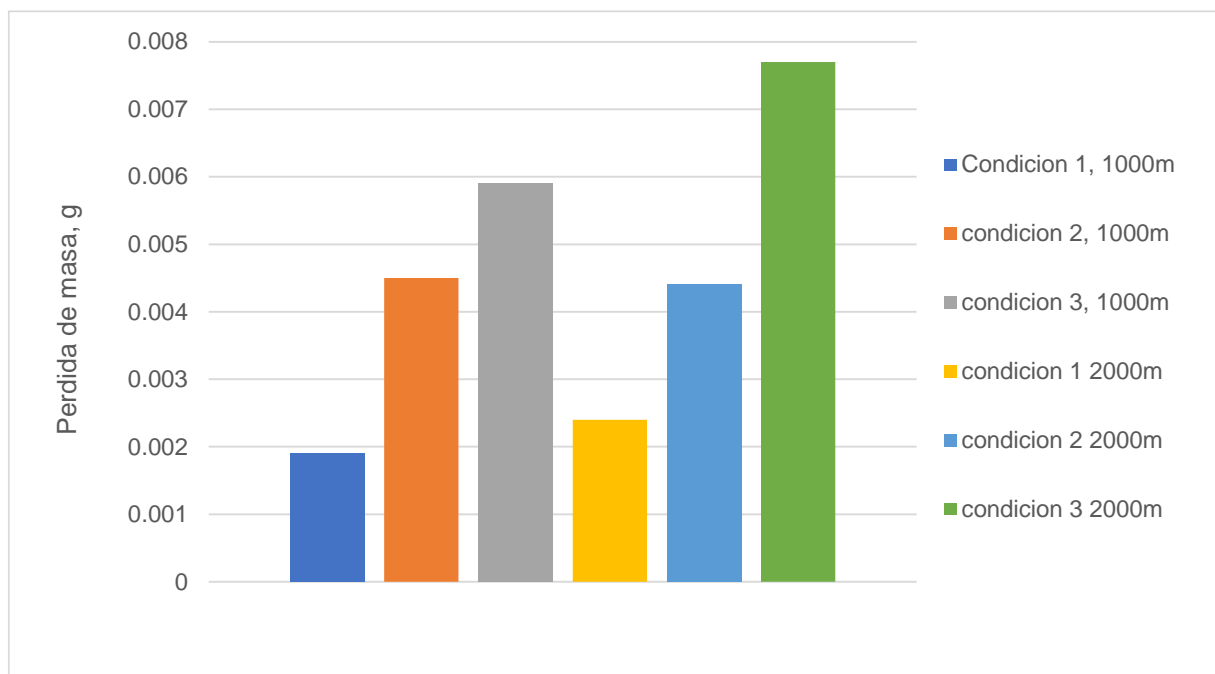


Fig. 3.11. Gráfico de la pérdida de masa promedio en espigas usadas en ensayos con discos cementados

Tabla 3.3. Valores de pérdida de masa en los discos de metal base recocido ensayado a desgaste con espiga de acero SAE O1.

Nº	Carga aplicada, N	Distancia de deslizamiento, m	Masa inicial, g	Masa final, g	Pérdida, g	Promedio, g
1	10	1,000	147.4751	147.4642	0.0109	0.0065
2			145.1496	145.1459	0.0037	
3			145.769	145.7642	0.0048	
1	15		147.8886	147.8805	0.0081	0.0090
2			149.8489	149.8352	0.0137	
3			144.416	144.4108	0.0052	
1	20		149.6744	149.6533	0.0211	0.0208
2			144.3072	144.2788	0.0284	
3			144.9102	144.8973	0.0129	
1	10	2,000	149.0868	149.0833	0.0035	0.0054
2			147.4249	147.4183	0.0066	
3			147.4422	147.4362	0.0060	
1	15		146.7011	146.6900	0.0111	0.0187
2			147.5245	147.5000	0.0245	
3			143.6652	143.6448	0.0204	
1	20		147.3242	147.2861	0.0381	0.0380
2			146.6136	146.587	0.0266	
3			148.2508	148.2015	0.0493	

Tabla 3.4. Valores de pérdida de masa en los discos cementados con post-tratamiento de temple y revenido ensayado a desgaste con espiga acero SAE O1.

Nº	Carga aplicada, N	Distancia de deslizamiento, m	Masa inicial, g	Masa final, g	Pérdida, g	Promedio, g
1	10	1,000	147.9872	147.9707	0.0165	0.0192
2			147.2300	147.217	0.0130	
3			148.5075	148.4793	0.0282	
1	15		148.5096	148.3604	0.1492	0.0694
2			147.3437	147.3126	0.0311	
3			147.5852	147.5573	0.0279	
1	20		138.3963	138.3593	0.037	0.0838
2			148.8022	148.7605	0.0417	
3			149.8115	149.6387	0.1728	
1	10	2,000	148.8612	148.8262	0.0350	0.0323
2			144.1348	144.1108	0.0240	
3			147.1991	147.1611	0.0380	
1	15		147.0494	147.0019	0.0475	0.0528
2			149.0053	148.9430	0.0623	
3			146.8524	146.8037	0.0487	
1	20		147.4695	147.3856	0.0839	0.1173
2			148.9193	148.7688	0.1505	
3			149.4856	149.3681	0.1175	

Tabla 3.5. Valores de pérdida de masa de espigas utilizadas en ensayos de desgaste con disco de acero SAE 3115 recocidos.

Nº	Carga aplicada, N	Distancia de deslizamiento, m	Masa inicial, g	Masa final, g	Pérdida, g	Promedio, g
1	10	1,000	2.3854	2.3848	0.0006	0.0011
2			2.3875	2.3865	0.0010	
3			2.3939	2.3921	0.0018	
1	15		2.3786	2.3773	0.0013	0.0011
2			2.3833	2.3821	0.0012	
3			2.3719	2.371	0.0009	
1	20		2.3873	2.3861	0.0012	0.0013
2			2.3828	2.3819	0.0009	
3			2.3801	2.3782	0.0019	
1	10	2,000	2.3871	2.3853	0.0018	0.0019
2			2.3921	2.3903	0.0018	
3			2.3774	2.3752	0.0022	
1	15		2.3803	2.3779	0.0024	0.0039
2			2.3737	2.3691	0.0046	
3			2.381	2.3762	0.0048	
1	20		2.3778	2.3748	0.0030	0.0037
2			2.3814	2.3793	0.0021	
3			2.3783	2.3722	0.0061	

Tabla 3.6. Valores de pérdida de masa de espigas utilizadas en ensayos de desgaste con disco cementados.

Nº	Carga aplicada, N	Distancia de deslizamiento, m	Masa inicial, g	Masa final, g	Pérdida, g	Promedio, g		
1	10	1,000	2.3898	2.3876	0.0022	0.0019		
2			2.3745	2.3724	0.0021			
3			2.3891	2.3876	0.0015			
1	15		1,000	2.374	2.3704	0.0036	0.0045	
2				2.3710	2.3653	0.0057		
3				2.3799	2.3757	0.0042		
1	20			1,000	2.3839	2.3789	0.0050	0.0059
2					2.3857	2.3827	0.0030	
3					2.3852	2.3755	0.0097	
1	10	2,000			2.3813	2.3772	0.0041	0.0024
2					2.3809	2.3789	0.002	
3					2.3772	2.3760	0.0012	
1	15		2,000		2.3720	2.3659	0.0061	0.0044
2					2.3891	2.386	0.0031	
3					2.3878	2.3838	0.004	
1	20			2,000	2.3763	2.3656	0.0107	0.0077
2					2.3678	2.3663	0.0015	
3					2.3925	2.3815	0.0110	

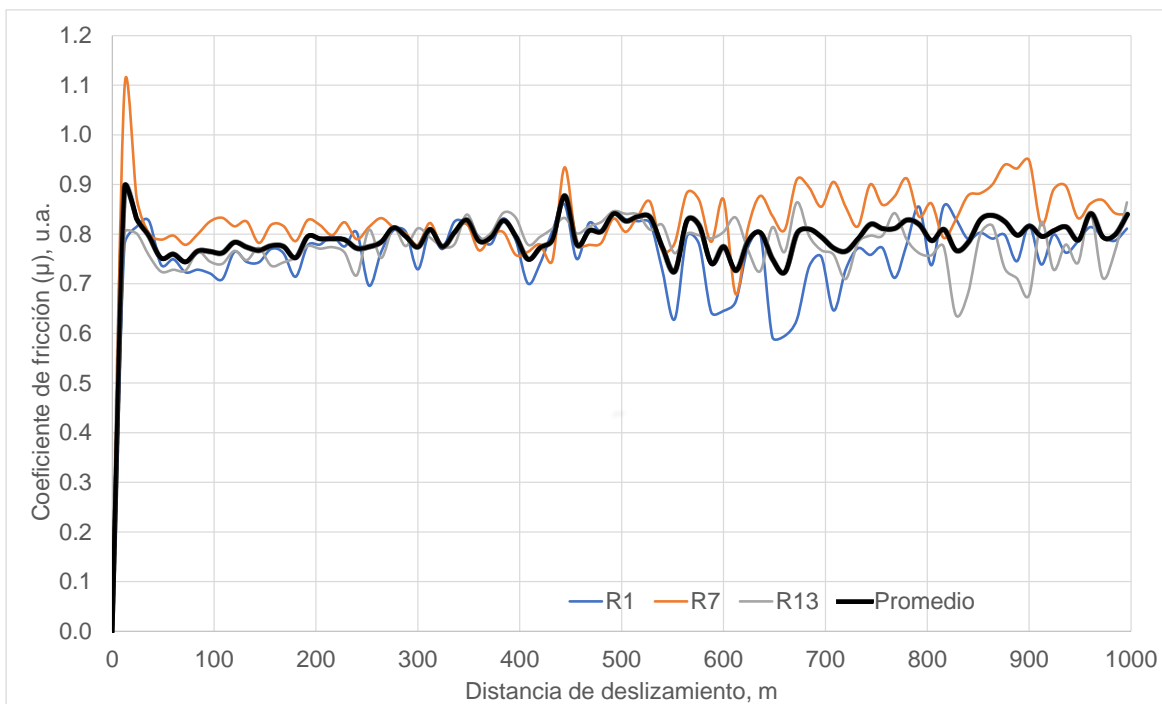


Fig. 3.12. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida en ensayos de desgaste utilizando discos de acero SAE 3115 recocidos y espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas, aplicando carga de 10 N y distancia de deslizamiento de 1,000 m.

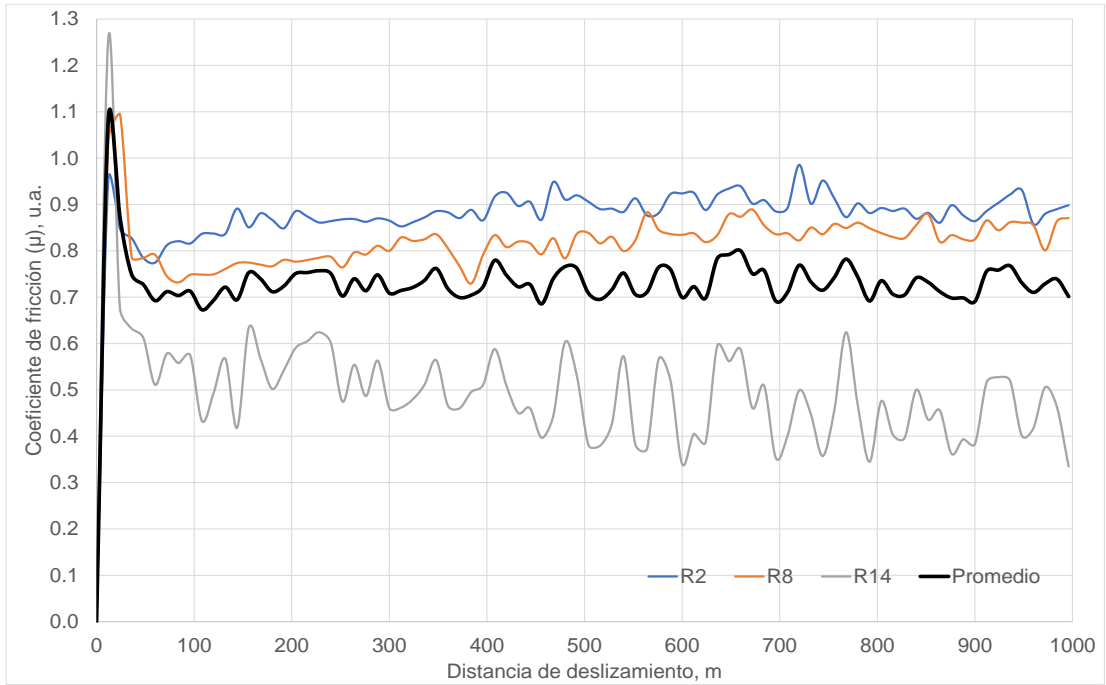


Fig. 3.13. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida en ensayos de desgaste utilizando discos de acero SAE 3115 recocidos y espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas, aplicando carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 1,000 m.

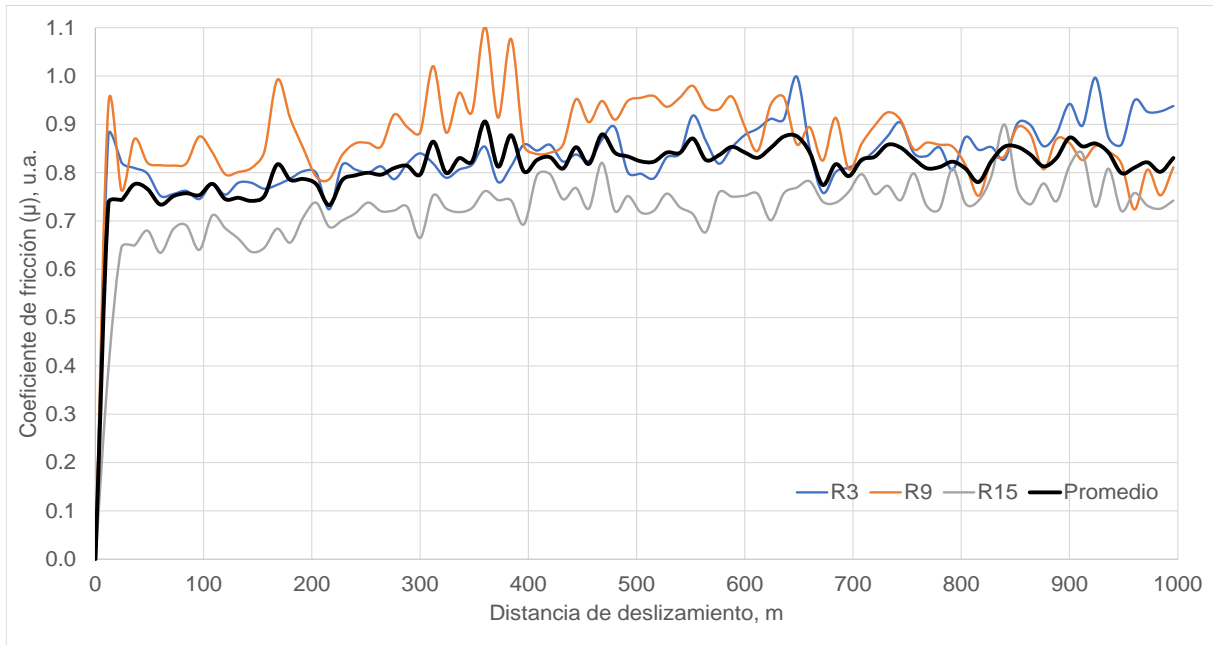


Fig. 3.14. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida en ensayos de desgaste utilizando discos de acero SAE 3115 recocidos y espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas, aplicando carga de 20 N y distancia de deslizamiento de 1,000 m.

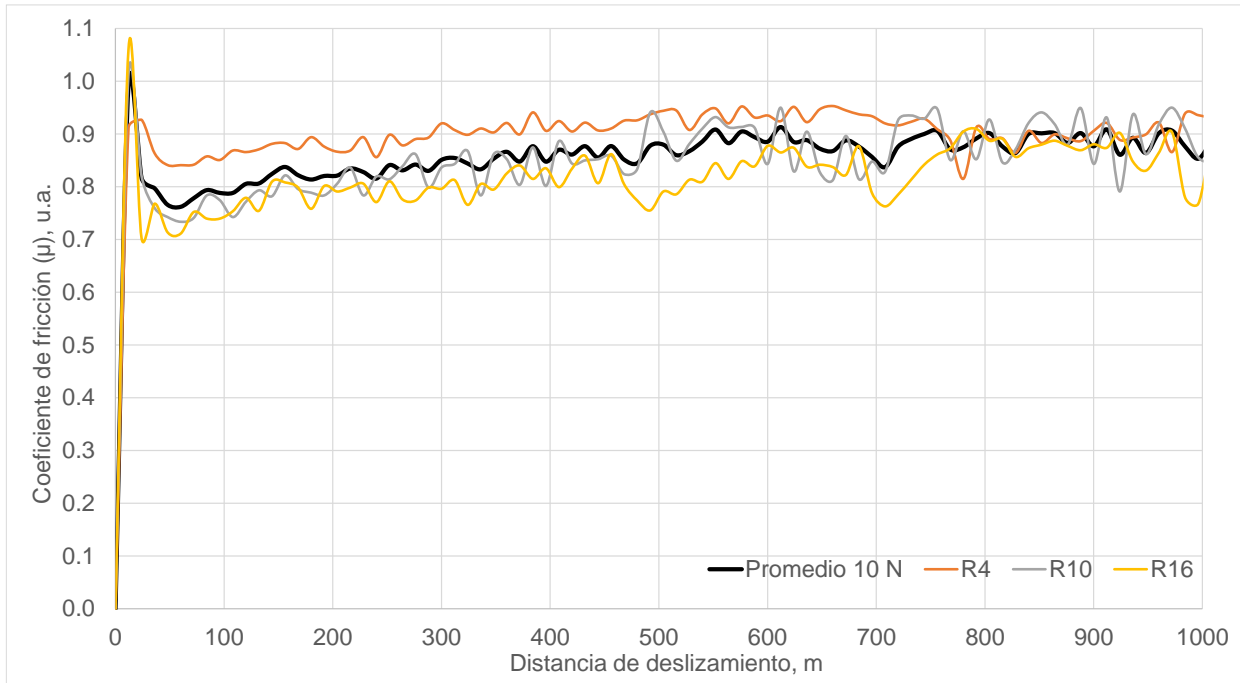


Fig. 3.15. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida en ensayos de desgaste utilizando discos de acero SAE 3115 recocidos y espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas, aplicando carga de 10 N y distancia de deslizamiento de 2,000 m.

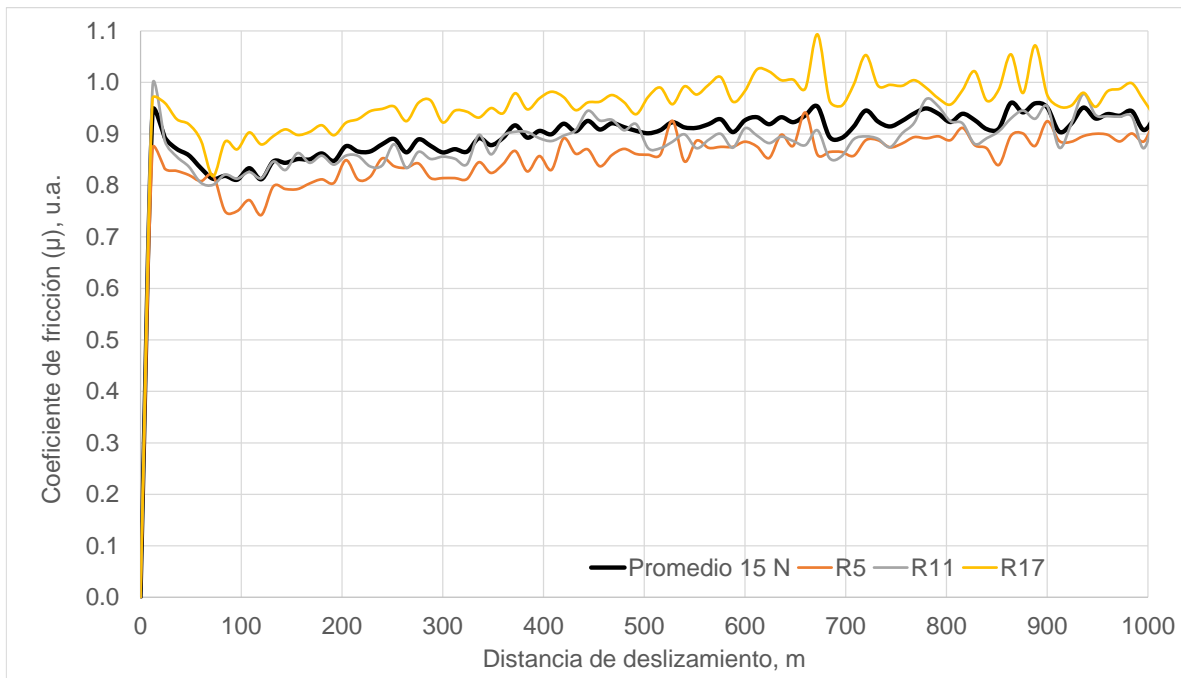


Fig. 3.16. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida en ensayos de desgaste utilizando discos de acero SAE 3115 recocidos y espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas, aplicando carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 2,000 m.

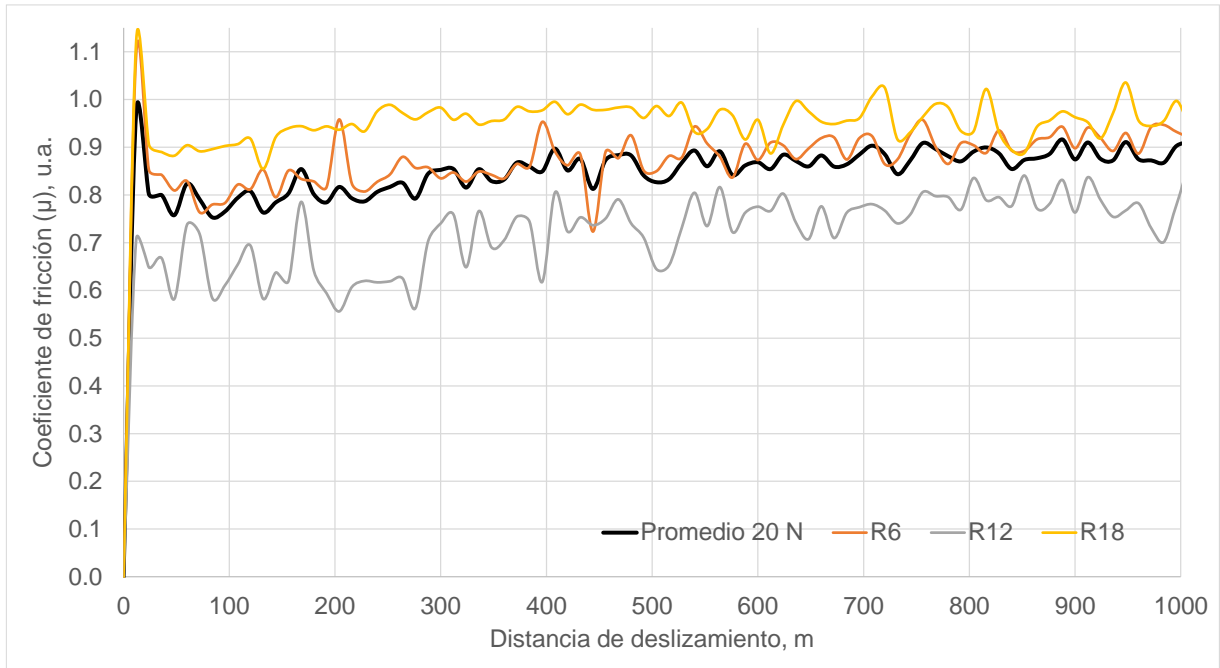


Fig. 3.17. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida en ensayos de desgaste utilizando discos de acero SAE 3115 recocidos y espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas, aplicando carga de 20 N y distancia de deslizamiento de 2,000 m.

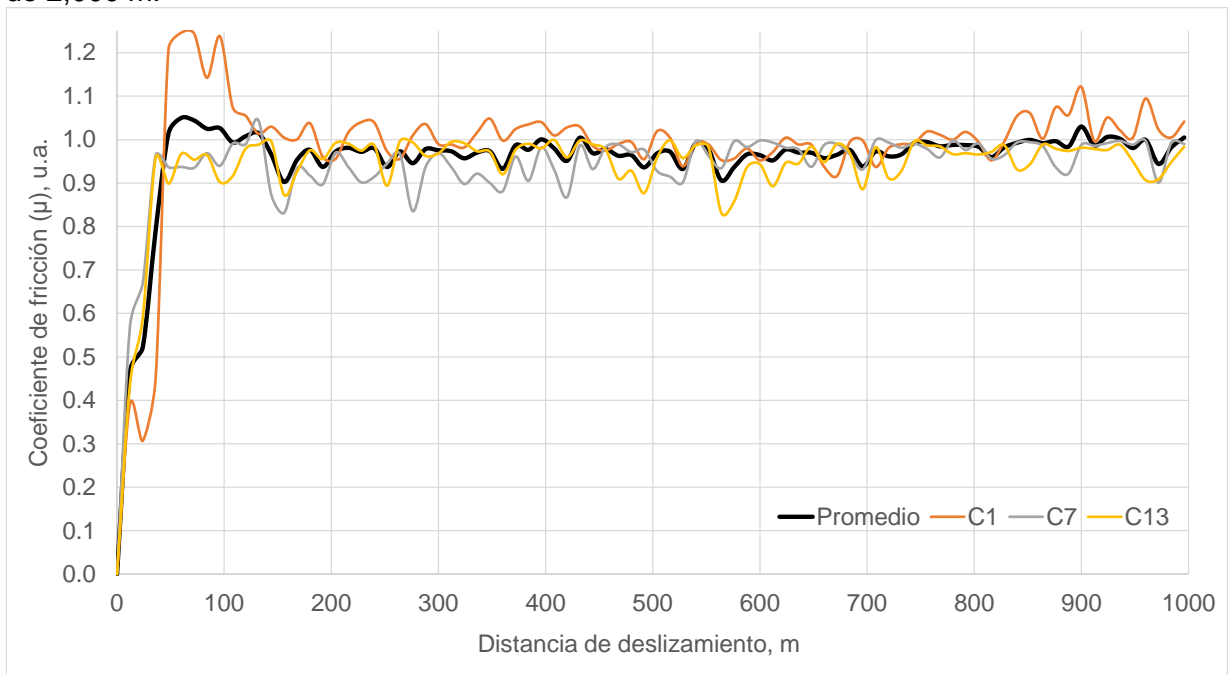


Fig. 3.18. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de desgaste utilizando discos de acero SAE 3115 cementados con post-tratamiento térmico de temple y revenido y espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas, aplicando carga de 10 N y distancia de deslizamiento de 1,000 m.

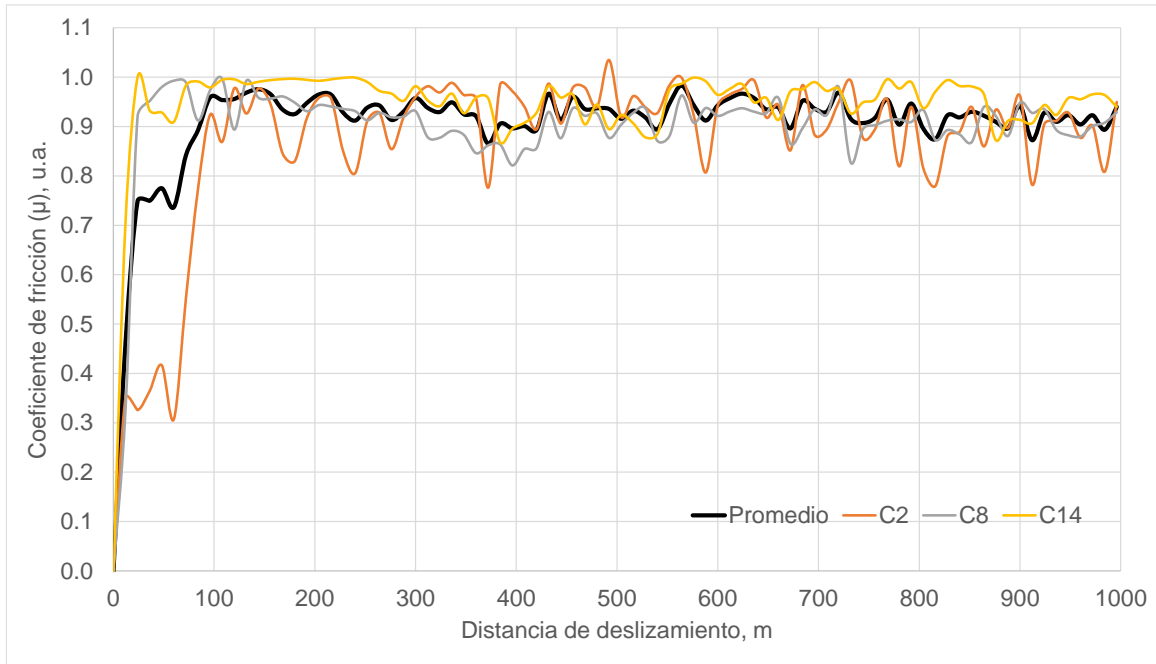


Fig. 3.19. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de desgaste utilizando discos de acero SAE 3115 cementados con post-tratamiento térmico de temple y revenido y espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas, aplicando carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 1,000 m.

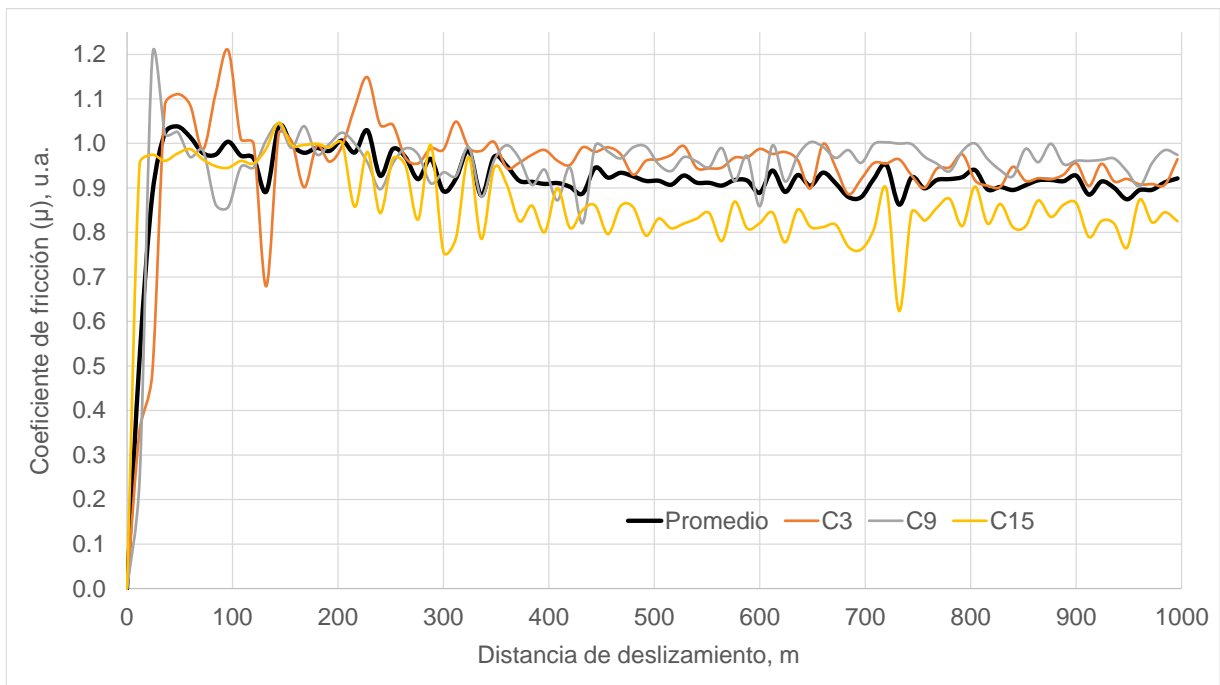


Fig. 3.20. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de desgaste utilizando discos de acero SAE 3115 cementados con post-tratamiento térmico de temple y revenido y espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas, aplicando carga de 20 N y distancia de deslizamiento de 1,000 m.

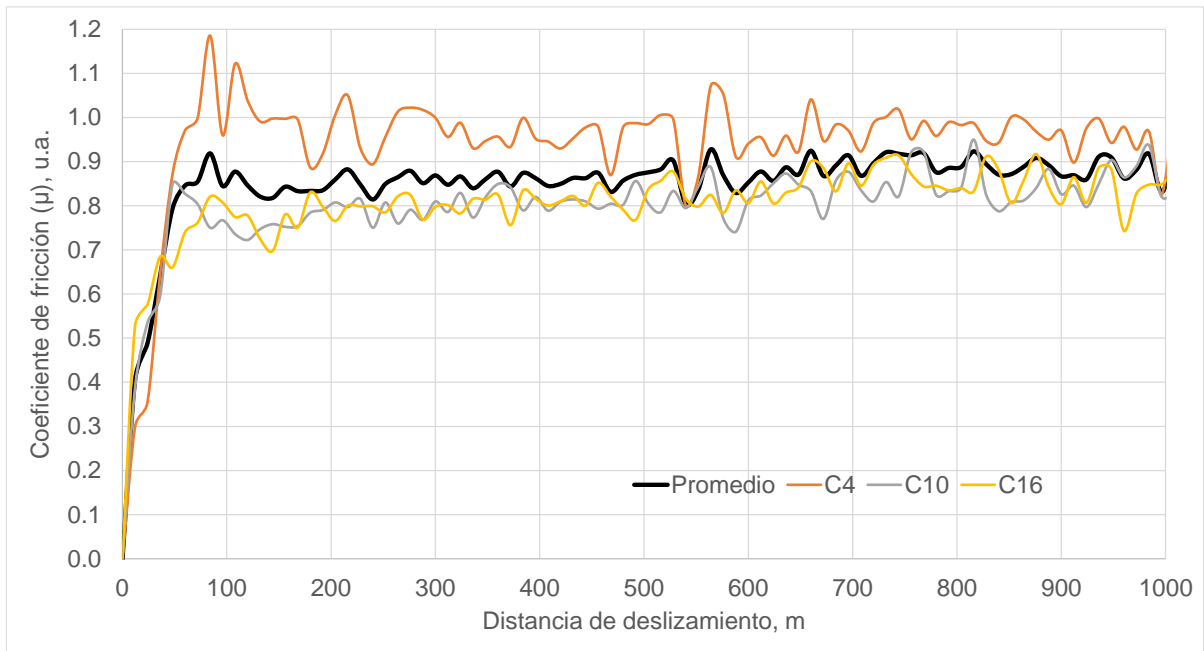


Fig. 3.21. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de desgaste utilizando discos de acero SAE 3115 cementados con post-tratamiento térmico de temple y revenido y espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas, aplicando carga de 10 N y distancia de deslizamiento de 2,000 m.

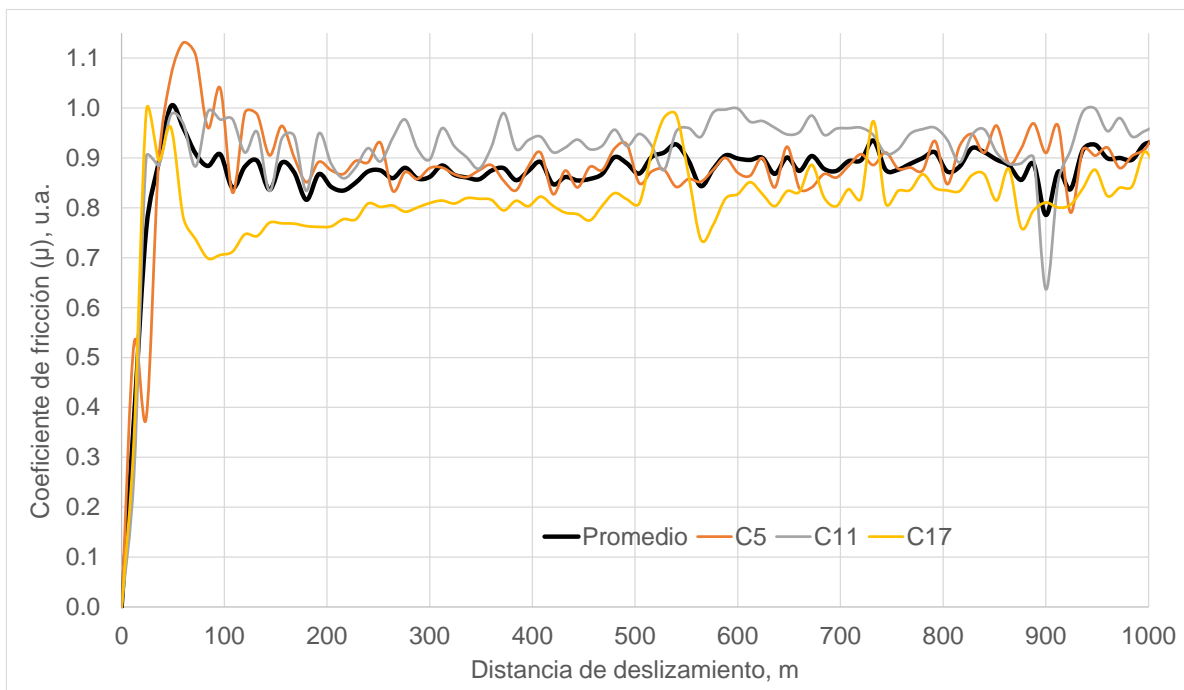


Fig. 3.22. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de desgaste utilizando discos de acero SAE 3115 cementados con post-tratamiento térmico de temple y revenido y espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas, aplicando carga de 15 N y distancia de deslizamiento de 2,000 m.

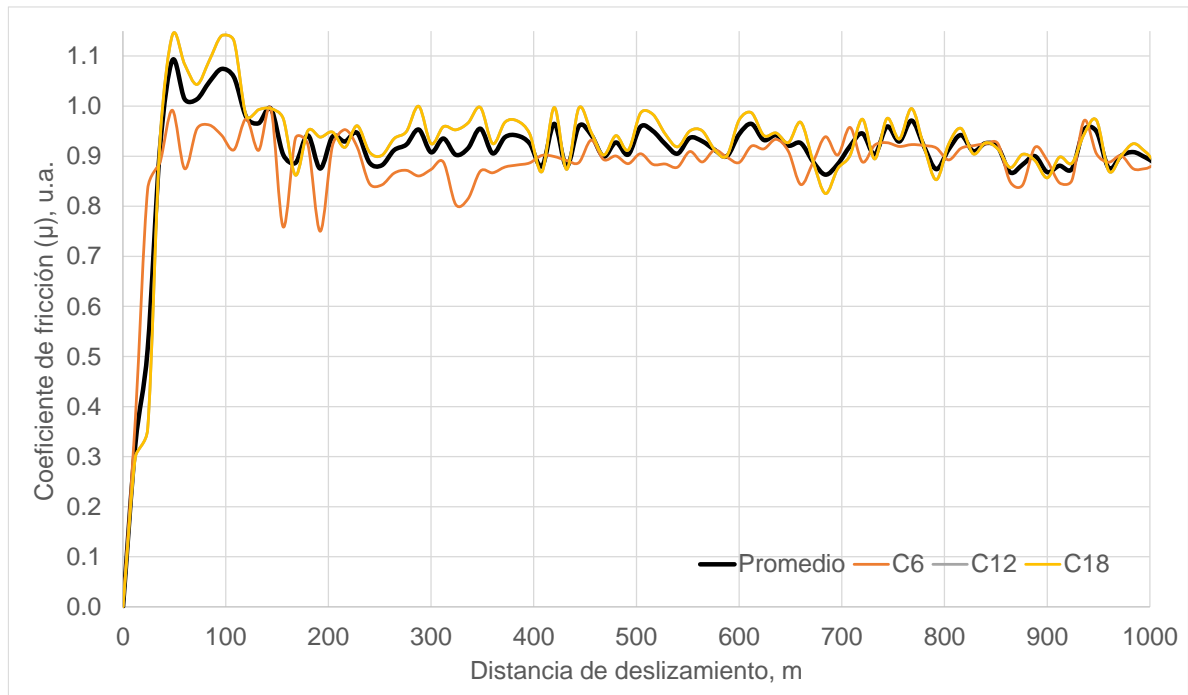


Fig. 3.23. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de desgaste utilizando discos de acero SAE 3115 cementados con post-tratamiento térmico de temple y revenido y espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas, aplicando carga de 20 N y distancia de deslizamiento de 2,000 m.

3.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta etapa de la investigación, luego de presentar los resultados obtenidos de la pérdida de masa en discos ensayados y en las espigas utilizadas, se presenta el análisis de los resultados. De esta manera se procedió a caracterizar los distintos ensayos y las combinaciones de cargas y distancias de deslizamiento.

3.4.1. ANÁLISIS DE DESGASTE

En las Tablas 3.3 – 3.6 se presenta qué, cómo es de esperar en un ensayo de desgaste, existe pérdida de masa tanto en los discos de acero SAE 3115 sin y con cementación con post-tratamiento térmico de temple y revenido como también en las espigas de acero SAE O1 con temple y revenido, se confirma la tendencia del aumento en pérdida de masa a medida que se ensaya una distancia de deslizamiento mayor, sin

embargo, esto no fue así para el grupo de 3 discos consideradas como material base ensayadas a 2,000 m y carga de 10 N ya que la tabla presenta que hubo menos desgaste (ver Fig. 3.8.), es decir menos pérdida de masa, sin embargo el comportamiento es normal en el caso de los discos con el tratamiento termoquímico.

Al analizar las pérdidas de masa tanto en discos cementados como no cementados, mostradas en las Tablas 3.3 – 3.4 se presenta una pérdida de masa más grande en los discos cementados, esto implica que el acero con cementación podría estar experimentando un mecanismo distinto de desgaste que el material sin cementación, otra razón por la cual la pérdida es mayor en los discos cementados podría ser que la capa cementada es más dura que en los discos sin cementación, aunque con una distribución no uniforme o también podría ser una capa cementada frágil debido a los parámetros en el post-tratamiento de temple y revenido y esto propicie un comportamiento distinto al ensayo de desgaste en comparación al comportamiento presentado por los discos sin cementar que permite que haya menos desgaste o pérdida de masa.

Como es de esperar en ensayos con distintas distancias de deslizamiento, el desgaste es mayor en ambo casos tanto como en discos sin y con cementación a medida que se incrementa la distancia de deslizamiento en los ensayos.

Comparando la cantidad de desgaste encontrada en los discos, el desgaste es mayor en los discos cementados, esto nos indica que los discos cementados presentan menor resistencia al desgaste en comparación con los discos no cementados.

Por último, al observar las espigas y el resultado de pérdida de masa es evidente que la tendencia también se mantiene ya que las espigas presentan más desgaste o pérdida de masa a medida que se aumenta la distancia de deslizamiento en los ensayos, de la misma manera también se observa un incremento de pérdida de masa en los ensayos con discos cementados en comparación con las espigas utilizadas en los ensayos con discos no cementados, en el caso de las espigas utilizadas para los ensayos de 1,000 m y 10 y 15 N se observa que el desgaste se mantuvo igual.

Posteriormente de obtener estos resultados se realizó un cambio en los discos cementados recociendo estos discos a 875 °C por 20 min. De tal manera que se dejen los discos a su estado de cementación sin post-tratamiento térmico de temple y revenido, los discos seleccionados para esto fueron los cementados 15, 3 y 9 los cuales fueron

ensayados a una carga de 20 N y una distancia de deslizamiento de 1,000 m, siendo estos últimos dos del nivel inferior y el primero del nivel superior del proceso de cementación y además se ensayaron en el otro rostro del disco, en la Tabla 3.7 se presentan los resultados de pérdida de masa de estos nuevos ensayos.

Tabla 3.7. Valores de pérdida de masa en los discos cementados y ensayado a desgaste con espiga acero SAE O1.

Nº	Carga aplicada, N	Distancia de deslizamiento, m	Masa inicial, g	Masa final, g	Pérdida, g	Promedio, g
1	20	1,000	137.7075	137.6930	0.0145	0.0135
2			147.9722	147.9603	0.0119	
3			148.7509	148.7367	0.0142	

Esta nueva pérdida de masa promedio en los discos cementados de 0.0135 g representa un 16.11% de la pérdida promedio medida inicialmente para este arreglo de discos-espiga para las mismas condiciones de ensayo, es decir, es mucho menor lo cual implica que el disco es más resistente al ensayo de desgaste y además este dato promedio de pérdida de masa es 35.1% menor que la pérdida de masa presentada por los discos en estado material base ensayados bajo las mismas condiciones.

Estos resultados sugieren que los discos cementados son más resistentes al ensayo de desgaste que los discos en estado material base, es importante mencionar que inicialmente la pérdida de masa siendo más alta en los discos cementados sugiere que en el proceso existen cambios en el mecanismo de desgaste pudiendo ser desgaste por adhesión en lugar de abrasión lo cual incrementa la pérdida de masa en los discos cementados, es de suma importancia mencionar que en los ensayos de desgaste pueden ocurrir bajo distintos mecanismos de desgaste como abrasión, adhesión, erosión, vibración, no obstante se debe producir graficas características de pérdida de masa versus distancia de deslizamiento para caracterizar el mecanismo existente en el ensayo o bien la aplicación de ecuaciones que ayudan a caracterizar el mecanismo, esto es aplicable tanto para los resultados del acero sin y con post tratamiento de temple y revenido puesto que en el caso para este acero en estudio existe mejora en la resistencia al desgaste. En la Fig. 3.24 se presentan las curvas de coeficiente de fricción versus

distancia de los 3 ensayos realizados en los discos con cementación sin post-tratamiento térmico de temple y revenido.

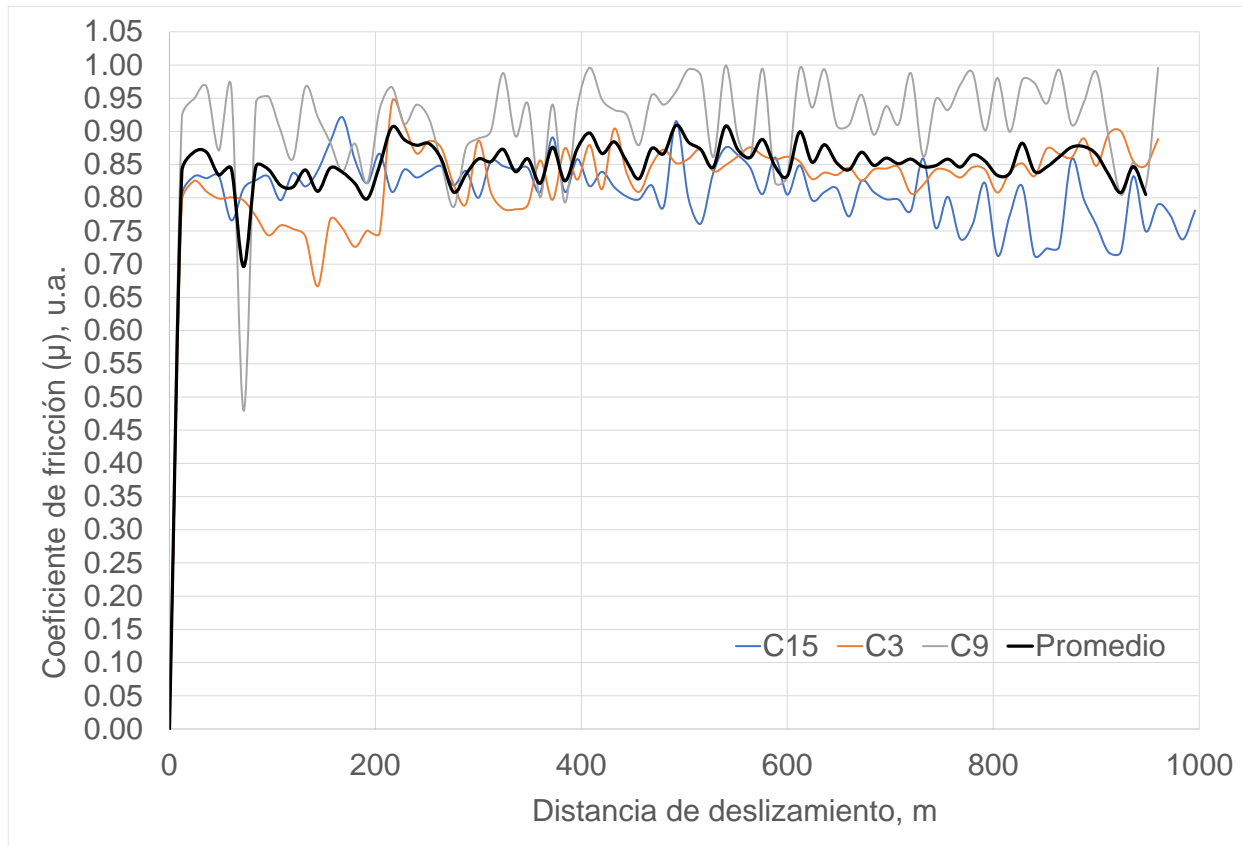


Fig. 3.24. Curvas del coeficiente de fricción con respecto a la distancia de deslizamiento recorrida para los ensayos de desgaste utilizando discos de acero SAE 3115 cementados y espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas, aplicando carga de 20 N y distancia de deslizamiento de 1,000 m.

En las Fig. 3.25 a 3.28 se presentan unas espigas provenientes de cada grupo de 3 ensayos en las cuales se observa la pérdida de masa provocada por el desgaste durante el ensayo.

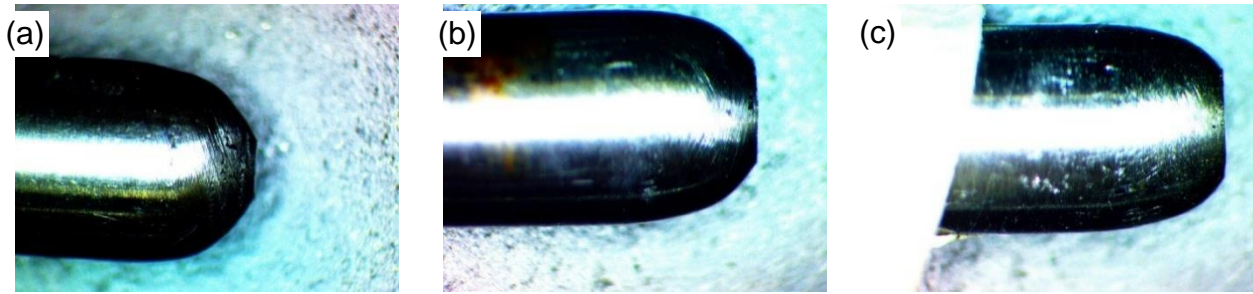


Fig. 3.25. Fotografías de espigas utilizadas en los ensayos de desgaste durante 1,000 m de distancias recorrida sobre discos de acero SAE 3115 recocidos aplicando cargas de: a) 10 N; b) 15 N y c) 20 N.

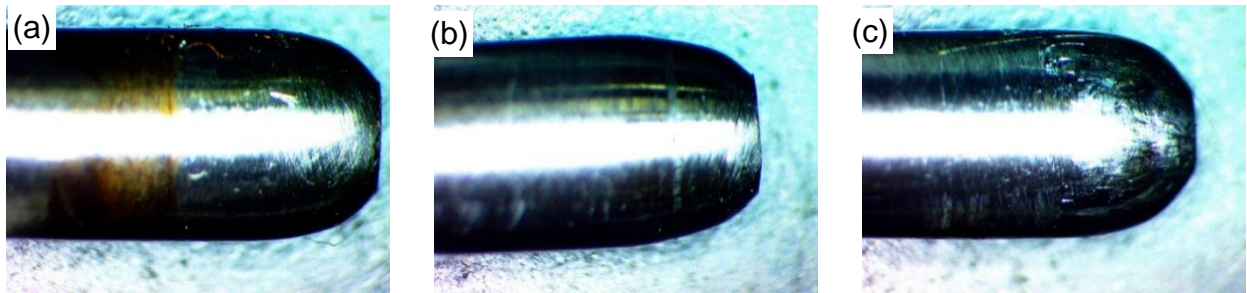


Fig. 3.26. Fotografías de espigas utilizadas en los ensayos de desgaste durante 2,000 m de distancias recorrida sobre discos de acero SAE 3115 recocidos aplicando cargas de: a) 10 N; b) 15 N y c) 20 N.

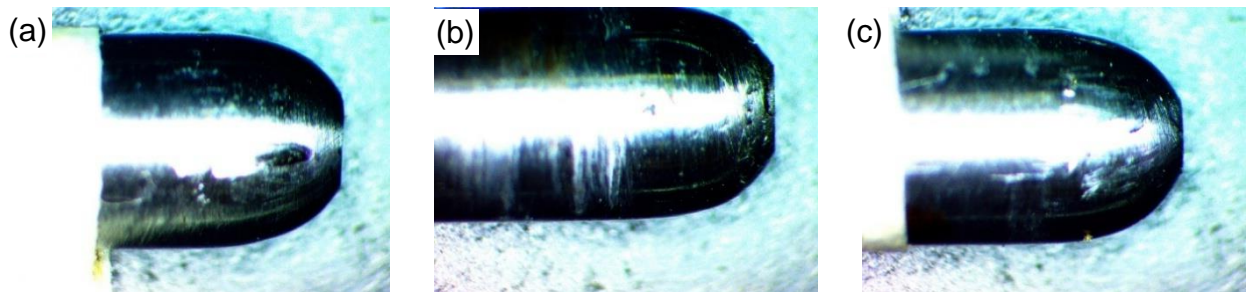


Fig. 3.27. Fotografías de espigas utilizadas en los ensayos de desgaste durante 1,000 m de distancias recorrida sobre discos de acero SAE 3115 cementados y con post-tratamiento térmico de temple y revenido aplicando cargas de: a) 10 N; b) 15 N y c) 20 N.

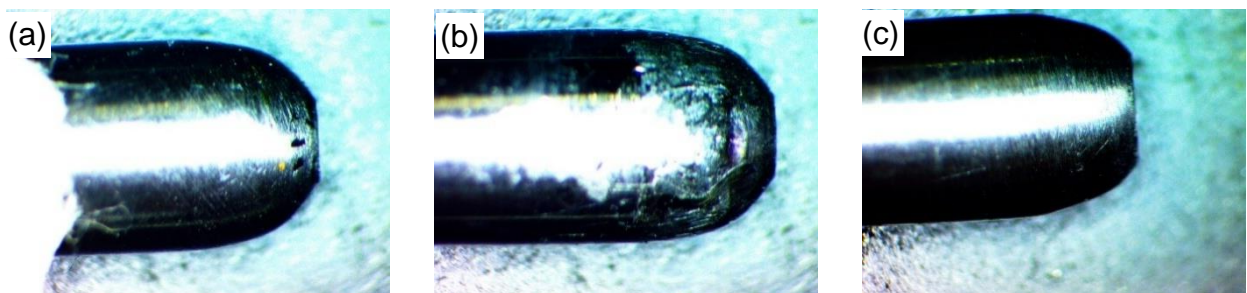


Fig. 3.28. Fotografías de espigas utilizadas en los ensayos de desgaste durante 2,000 m de distancias recorrida sobre discos de acero SAE 3115 cementados y con post-tratamiento térmico de temple y revenido aplicando cargas de: a) 10 N; b) 15 N y c) 20 N.

3.4.2. ANÁLISIS DE COEFICIENTE DE FRICCIÓN

En las Figs. 3.12 - 3.24 las cuales incluyen tanto discos sin y con cementación, y además, los 3 nuevos discos ensayados de nuevo los cuales sólo tienen cementación sin post-tratamiento de temple y revenido, se observa que siempre al inicio de los ensayos de desgaste a distancia menores que 200 m se presenta una etapa donde el valor del coeficiente es alto o bien las fuerzas de fricción son altas de tal manera que el calcular el coeficiente de fricción este resulta ser mayor que 1, esto es debido a la etapa de inicio del ensayo de desgaste la cual consiste en una transición a la carga aplicada, este comportamiento se puede deber a la limpieza inicial que tenga tanto el disco como la espiga momentos previos a iniciar el ensayo, no obstante después de los 200 m se observa una fluctuación más similar en todo el recorrido de la distancia restante del ensayo o bien un estado de equilibrio, es importante mencionar que en algunos ensayos y en ciertas partes de la gráfica que representa el coeficiente de desgaste obtenido a lo largo del ensayo, este coeficiente se ve elevado por encima de la unidad, aunque este valor ronda entre 0 y 1 estos valores que sobrepasan este rango se pueden deber a las lecturas que representa el módulo de ensayo o calibración del equipo utilizado a lo largo de todos estos ensayos.

Dado lo anterior, en las Tablas 3.8 - 3.9 se representan los coeficientes de fricción promedios obtenido mediante cálculos en para las diferentes condiciones de material y ensayos.

Tabla 3.8. Valores de coeficiente de fricción para los ensayos material base, promedio individual y promedio por combinación de cargas y distancias de deslizamiento.

N°	Carga aplicada, N	Distancia de deslizamiento, m	Promedio individual	Promedio total
1	10	1,000	0.77	0.79
2			0.83	
3			0.78	
1	15		0.88	0.73
2			0.82	
3			0.5	
1	20		0.84	0.82
2			0.88	
3			0.73	
1	10	2,000	0.91	0.86
2			0.83	
3			0.83	
1	15		0.88	0.92
2			0.92	
3			0.97	
1	20		0.92	0.87
2			0.73	
3			0.96	

Tabla 3.9. Valores de coeficiente de fricción para los ensayos de discos cementados, promedio individual y promedio por combinación de cargas y distancias de deslizamiento.

N°	Carga aplicada, N	Distancia de deslizamiento, m	Promedio individual	Promedio total
1	10	1,000	1.00	0.97
2			0.95	
3			0.95	
1	15		0.88	0.91
2			0.91	
3			0.95	
1	20		0.96	0.93
2			0.96	
3			0.87	
1	10	2,000	0.95	0.89
2			0.86	
3			0.87	
1	15		0.92	0.90
2			0.94	
3			0.83	
1	20		0.90	0.92
2			0.93	
3			0.93	

4. DETERMINACIÓN DE COSTOS

El estudio económico de todo proyecto es una etapa que se debe considerar con detenimiento, ya que en esta parte de la investigación se determinan los costos necesarios para desarrollarlo. Por lo tanto, se debe tener un amplio panorama de cada insumo utilizado para concretarla, clasificándose en materia prima, mano de obra, materiales consumibles, equipo y herramientas útiles para llevar a cabo el proyecto.

El objetivo es detallar los costos necesarios para la preparación de las espigas y los discos, la obtención de carbón vegetal de madera de bálsamo, la preparación de la mezcla carburante y el análisis de resultados en el ensayo de espiga sobre discos, además de la depreciación de los equipos utilizados en la investigación.

4.1. COSTO DE MATERIA PRIMA

En este primer apartado se determinan los costos de la producción del carbón vegetal y de la mezcla cementante, así como el costo de los materiales para fabricar la caja que se utilizará para realizar el tratamiento termoquímico de cementación.

De igual manera se presenta el costo del acero SAE 3115 y del acero SAE O1 según la cotización de los proveedores, por último, también se cotizarán el costo de los materiales consumibles que serán necesarios para la fabricación de los discos.

4.1.1. COSTOS DE LA PRODUCCIÓN DE LA MEZCLA CARBÓN VEGETAL-ACTIVADOR

A continuación, se detallan los costos de cada insumo para la producción del carbón vegetal, este método al ser de carácter artesanal se utilizarán varias herramientas manuales. También, se detalla los costos para la preparación de la mezcla carburante necesaria para cementar los discos.

- **Costo para producir el carbón vegetal.**

Para la producción del carbón vegetal se optó por el método de fosa, el cual es uno de los métodos más económicos y prácticos, consiste en excavar una fosa, rellenarla de madera y taparla con tierra excavada para aislar la cámara. Para esto la inversión de capital es mínima; se necesitan herramientas manuales como una pala, un azadón, entre otros. Tal como se presenta en la Tabla 4.1 una serie de herramientas y materiales para la producción del carbón vegetal.

Para la excavación de la fosa se consideró 3 trabajadores por 8 h laborales a un salario de \$2.50 la h, tomando como base el sueldo mínimo actual según el código de trabajo se hará un recargo, haciendo un total de \$60.

Tabla 4.1. Herramientas y materiales para la producción del carbón vegetal.

Herramientas y materiales	Cantidad	Costo, \$
Mano de obra	3 personas	60.00
Pala redonda mango corto liviana	2	7.95
Azadón con mango	2	14.95
Piocha con mango corto	1	14.50
Lámina reciclada	4	5.00
Pante de leña	1	25.00
Total:		150.30

- **Costo de la mezcla carburante**

Para realizar el tratamiento termoquímico de cementación se utilizará una mezcla de proporción en peso de carbón vegetal y carbonato de bario de 80:20 porcentajes en peso con lo cual se espera tener los resultados adecuados.

El peso necesario de carbón vegetal es de 343 g el cual corresponde al 80% por lo tanto el porcentaje de carbonato de bario a utilizar corresponde a 85.75 g el cual representa el 20%. La presentación comercial del carbonato de bario es de 1,000 g, con un costo de \$130, al realizar la conversión según la cantidad utilizada nos da un costo de \$11.14.

4.1.2. COSTO DE LA CAJA PARA CEMENTACIÓN

El material seleccionado para la fabricación de la caja es la lámina ASTM A36 de 1/16 pulgadas de espesor, en el mercado se encuentran dos presentaciones comerciales, la lámina de 2 x 1 m y de 8 x 4 pie, por las dimensiones de la caja del diseño de este trabajo se opta por la lámina de 2 x 1 m, de esta manera se busca minimizar costos y desperdicio de material, también se debe tener en consideración las h necesarias para la fabricación, en la Tabla 4.2 se presenta el listado de materiales para su construcción.

Tabla 4.2. Costo de materiales para construir la caja de cementación.

Materiales	Cant.	C/U, \$	C/T, \$
Lámina ASTM A36 2 x 1 m de 1/16 pulg	1	28.25	28.25
Libras de electrodo E7018 de 1/32 pulg	2	1.90	3.80
Disco de corte de 4-1/2 pulg	7	1.75	12.25
Disco de desbaste de 4-1/2 pulg	2	2.35	4.70
Disco de polifán de 4-1/2 pulg	3	5.15	15.45
H de trabajo	8	1.5	12.00
Total:			76.45

4.1.3. COSTOS DE LOS ACEROS PARA LOS DISCOS Y ESPIGAS

El acero SAE 3115 es el material seleccionado para fabricar los discos, este ha sido cotizado en MAPRIMA, el material para la elaboración de las espigas de acero es el SAE O1, este material se cotizo en ACAVISA, a continuación, se presentan los costos de materia prima para los discos y las espigas. En la Tabla 4.3 se presenta una serie de materiales para la fabricación de discos.

Tabla 4.3. Costos de materia prima para la fabricación de discos y espigas.

Material	Cant.	C/T, \$
Acero SAE 3115 de 2 pulg	50 cm	19.56
Acero SAE O1 de 4mm	100 cm	6.60

4.1.4. COSTO DE MATERIALES CONSUMIBLES PARA LA PREPARACIÓN DE LOS DISCOS

La materia prima para la fabricación de los discos y las espigas debe pasar por un proceso de manufactura y así garantizar las dimensiones y la limpieza necesaria de cada disco que se sometió al ensayo de desgaste espiga sobre disco, esto asegura que se obtenga los resultados adecuados y precisos al homogeneizar todos los discos a las mismas condiciones de tratamiento.

En la Tabla 4.4 se presenta el detalle de los costos de los consumibles y los insumos necesarios para la preparación de los discos antes de la etapa de cementación y ensayo. Y en la Tabla 4.5 se presenta los costos totales de materia prima.

Tabla 4.4. Costo de consumibles para la preparación de discos.

Consumible	Unidad	C/U, \$	C/T, \$
Buril de tungsteno	1	10.00	10.00
Hoja de sierra	3	0.45	1.35
Broca	1	1.44	1.44
Aceite 5W30	946 ml	9.40	9.40
Jabón líquido	500 ml	2.50	2.50
Soda cáustica	350 g	1.75	1.75
Alcohol 90	750 ml	1.5	4.50
Aceite quemado para temple	Cubeta	25.00	25.00
Lija de SiC # 1,200	72	1.00	72.00
Lija de SiC # 800	72	1.00	72.00
Lija de SiC # 600	108	1.00	108.00
Lija de SiC # 500	108	1.00	108.00
Lija de SiC # 400	108	1.00	108.00
Lija de SiC # 200	108	1.00	108.00
Lija de SiC # 100	108	1.00	108.00
Toper hermético	Unidad	3.00	9.00
Papel absorbente	Unidad	1.50	1.50
Bolsas herméticas	Unidad	1.40	1.40
Total:			726.84

Tabla 4.5. Total, costo de materia prima.

Descripción	C/T, \$
Herramientas y material para producir el carbón	150.30
Caja de cementación	76.45
Acero para discos y espigas	26.16
Carbonato de bario	11.14
Consumibles para preparación de discos	726.84
Subtotal:	990.89

4.2. COSTO DEL USO DE EQUIPOS

Para la determinación de los costos de la investigación, se consideró aquellos costos que provienen del uso de los equipos de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador, los equipos necesarios para realizar esta investigación son aquellos que intervienen directamente en la realización del tratamiento termoquímico, los cuales son un horno, el durómetro, el embutidor de discos, el cortador de discos, la lupa, el microscopio. También, se incluyen aquellos costos que se generan del uso de local, esto implica el uso de servicios básicos la energía eléctrica y el agua.

Se ha considerado un estudio de 38 discos, esto implica que se debe maquinar el material y luego utilizar el horno para el tratamiento termoquímico, por lo tanto, se debe considerar el gasto energético y los servicios utilizados, posteriormente se deben preparar las piezas, para luego ensayarlas y caracterizar la capa cementada lo cual implica el uso de los equipos antes mencionados.

4.2.1. COSTOS DEL USO DE EQUIPOS PARA PREPARACIÓN DE DISCOS PARA CEMENTACIÓN

Para determinar el costo del uso de estos equipos para la preparación de los 36 discos, primero se considera el maquinado, este material se encuentra con una medida de 50.8 mm y se debe maquinar hasta un diámetro de 50 mm, esto se realizó un torno convencional marca VICTOR modelo 1640.

Primero se obtiene la depreciación, esto se calcula sobre la base del Artículo 30 de la Ley de Impuesto sobre la Renta de El Salvador, de acuerdo con la Tabla 4.6 en la cual se presenta el porcentaje del valor de la maquinaria luego de su uso o explotación.

Tabla 4.6. Porcentaje del valor de la maquinaria luego de su uso o explotación.

Años de vida	Porcentaje de valor del costo de la maquinaria o bienes muebles usados, %
1	80
2	60
3	40
4 o más	20

La ecuación para el cálculo de la depreciación es la siguiente:

$$D_p = \frac{P - L}{n} \quad (3.1)$$

donde: D_p es la depreciación del equipo,

P es el costo inicial,

L es el valor residual, y

n es la vida útil de la máquina.

Para los valores del costo de la depreciación del torno, y sustituyendo en la Ec. 3.1, se obtiene:

$$D_p = \frac{\$15,000 - (\$15,000 * 20\%)}{10}$$
$$D_p = \$1,200.00$$

En el año 35 es donde se realizó esta investigación y por ende es el año que se toma para los cálculos de D_p y valor de salvamento. Considerando 38 discos y un tiempo de maquinado de 6 h incluyendo cilindrado y refrentado, la depreciación del torno es de \$0.60 por h, y si se culminan 4 discos en una h, la depreciación de la máquina para un disco es de **\$0.15**.

Considerando un afinado de caras paralelas en la rectificadora, de la misma manera se procedió con los cálculos para la rectificadora:

$$D_p = \frac{\$16950 - (\$16950 * 80\%)}{20}$$
$$D_p = 169.5\$$$

Depreciación de \$0.03 por h, considerando rectificar 3 discos por h es decir **\$0.01** depreciación por disco para el año 1 del equipo.

Se necesita determinar los costos que implican el consumo eléctrico, estos van de acuerdo con la ubicación del lugar, la cual sería, municipio de Metapán distrito de Santa Ana Norte, la distribuidora es AES, por lo tanto, el costo por kWh es de: \$0.170

Todos los discos se finalizaron en 2 días de trabajo, lo cual se distribuye en 20 min para maquinado y 25 min para el rectificado, el costo energético de estas operaciones por disco es el siguiente:

$$\text{Costo energetico unitario maquinado} = 5.22\text{kwa} * \frac{1}{3}h * 0.170$$

$$\text{Costo energetico unitario maquinado} = \mathbf{\$0.30}$$

$$\text{Costo energetico unitario rectificado} = 1.5\text{kwa} * \frac{5}{12}h * 0.170$$

$$\text{Costo energetico unitario rectificado} = \mathbf{\$0.11}$$

Otros costos que se consideran son consumibles para realizar esta preparación, tales como: 1 galón de aceite 20W50 \$30.45 para lubricar el torno y recubrir los discos, 2 brochas para recubrir piezas y limpiar torno \$10.50, wipe de hilo \$0.90 libra, 1 herramienta de corte del torno \$22.00, dividiendo estos costos entre los 38 discos fabricados se tiene un costo unitario de **\$1.77**.

Para determinar el costo del lijado grueso, se considera lija de SiC, 3 pliegos lija # 100, 3 pliegos lija # 200, 3 pliegos lija # 400, 3 pliegos lija # 500, 3 pliegos lija # 600, 2 pliegos lija # 800, 2 pliegos lija # 1,000, 2 pliegos lija # 1,200, para cada disco el total de estas lijas con costos a la fecha de esta investigación es de \$20.00 en total el costo para las lijas sería \$720.00 lo que resulta un costo unitario por disco de **\$20.00**. Dado que este proceso utiliza agua, se considera el costo de 0 a 10 m³ de agua del servicio local el cual es \$2.29 (costos actualizado enero 2,025), considerando un tiempo de 2 semanas de trabajo de lijado, si se utiliza 5 m³ al día, el costo unitario para cada disco es de **\$3.18**.

También se debe agregar el costo de mano de obra, para este se calcula utiliza la misma metodología que para el maquinado donde también se consideran 2 días de trabajo, por lo cual el costo unitario de mano de obra por lijado es **\$6.66**.

Costo de utilización de local, para el área de Metapán, un local tiene un costo promedio de \$450.00, que serían \$112.5 por semana y se considera que la elaboración de los discos durara 1 semana entonces considerando este costo por las 38 discos realizadas resulta para cada uno de los discos de **\$3.13**. Así, en la Tabla 4.7 se resumen lo anterior.

Tabla 4.7. Detalle unitario de los distintos costos para la preparación de un disco de acero SAE 3115 para cementación.

Actividad	Costo por disco, \$
Depreciación	0.16
Consumo energético	0.41
Consumibles	1.77
Costo local	3.13
Costo lijado grueso	23.18
Costo total disco preparada:	28.65

4.2.2. COSTOS DEL USO DEL HORNO

Luego de que se ha considerado los costos de la preparación de los discos, se debe considerar el costo del tratamiento termoquímico para 36 discos, utilizando la metodología anterior para los equipos el cual en este caso es el horno, se considera el horno eléctrico ubicado en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador, primero se procedió a calcular la depreciación del mismo, considerando 3 años de vida útil y con un valor de salvamento del 40%, se tiene:

$$D_p = \frac{\$3,000 - (\$3,000 * 40\%)}{25}$$

$$D_p = 72\$$$

La depreciación por disco, considerando 8 h de uso del horno para cementar 18 discos, se tiene un valor de **\$0.20**. Ah se debe determinar el costo energético de la misma manera que se hizo para el proceso de preparación se tiene:

$$\text{Costo energético unitario } T.T = \frac{4.5 \text{ kW}a * 24 \text{ h} * 0.170}{36}$$

$$\text{Costo energético unitario } T.T = \$0.51$$

Para determinar el costo del uso del local se utiliza la metodología anterior, aunque considerando 1 días de trabajo se tiene un costo unitario por local para cada disco de **\$6.25**, lo cual se resume en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Detalle unitario de los distintos costos para la preparación de un disco de acero SAE 1020 para cementación.

Actividad	Costo por disco, \$
Depreciación	0.20
Consumo energético	0.51
Costo local	6.25
Costo total disco preparado:	6.96

4.2.3. COSTOS DEL USO DE EQUIPOS PARA PREPARACIÓN DE DISCOS PARA CARACTERIZACIÓN Y ENSAYOS

Luego que la pieza fue tratada termoquímicamente por cementación, es necesario realizar la medición de propiedades y caracterización del disco, para esto lo primero que se debe considerar es cortar los discos con un corte de sección transversal, así mismo embutir la pieza y luego el lijado. Por lo tanto, la depreciación de los equipos para la preparación de los discos es la siguiente:

Depreciación de la cortadora de discos:

$$D_p = \frac{\$2995 - (\$2995 * 80\%)}{8}$$

$$D_p = 74.88 \$$$

Para cada disco:

$$D_p = \$2.08$$

Del mismo modo la depreciación para la embutidora es:

$$D_p = \frac{\$1478 - (\$1478 * 80\%)}{8}$$

$$D_p = 36.95\$$$

Para cada disco:

$$D_p = \$1.03$$

En la Tabla 4.9 se presenta el resumen del costo del uso de equipos para caracterización.

Tabla 4.9. Detalle unitario de los distintos costos para la preparación de un disco de acero SAE 3115 para ensayo espiga sobre disco.

Actividad	Costo por disco, \$
Depreciación	3.11
Consumo energético	Despreciable
Costo local	1.50
Costo total disco preparada:	4.61

4.2.4. COSTOS DEL USO DE EQUIPOS PARA CARACTERIZACIÓN (DURÓMETRO, MICROSCOPIO, LUPA)

Los costos necesarios para caracterizar la dureza superficial y profundidad de la capa cementada, se determinan de la manera siguiente. Primero se calcula la depreciación de 3 equipos los cuales son un durómetro Innova test VERZUS 750cd de \$72,000 año 1 de vida útil; una lupa AmScope Led 144s de \$491.00 en el año 5 de vida útil, y un microscopio óptico marca Leitz Metallovert de \$2,000.00 y una vida útil de 2 años.

- Para el durómetro:

$$D_{pdurometro} = \frac{\$72,000 - (\$72,000 * 80\%)}{8}$$

$$D_{pdurometro} = \$1,800$$

Así, para cada disco se tiene:

$$D_{pdurometro} = \$50$$

- Para la lupa:

$$D_{plupa} = \frac{\$491 - (\$491 * 20\%)}{6}$$

$$D_{plupa} = \$65.5$$

Así, para la lupa se tiene:

$$D_{plupa} = \mathbf{\$1.82}$$

- Para el microscopio:

$$D_{pmicroscopio} = \frac{\$2,000.00 - (\$2,000.00 * 20\%)}{2}$$

$$D_{pmicroscopio} = \$800.00$$

Así, para el microscopio se tiene

$$D_{pmicroscopio} = \mathbf{\$22.22}$$

Para determinar el costo del uso del local se considera que cada disco es estudiado una hora para realizar la prueba de dureza, es decir cuatro h para los cuatro discos a estudiar, y para la determinación de la profundidad de la capa cementada es al menos dos días, para la misma cantidad de discos a estudiar, estos tiempos resultan en veinte h lo cual es tres días de utilización del local, retomando la metodología, el costo de local es de \$45.00, el costo por disco es de **\$11.25**. El costo de la energía eléctrica es la que se utiliza sumando todos los aparatos eléctricos a utilizar, considerando un salón iluminado completamente, ocho tubos fluorescentes de luz, cada tubo consume 32W, y el cobro por kWh de \$0,170. El costo es de \$0.72, y el costo por disco es de **\$0.02**, además se deben considerar el gasto del durómetro que es de 200 W lo que da un costo de **\$0.102**; para la lupa esta consume 15 W sería un gasto de **\$0.027** y para el microscopio este consume 100 W sería un gasto de **\$0.095** los costos por disco para el uso de estos dos equipos se presentan en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10. Detalle unitario de los distintos costos de utilización de 2 equipos para caracterizar los discos.

Actividad	Costo por disco, \$
Depreciación	74.04
Consumo energético	0.244
Costo local	1.50
Costo total disco preparado:	75.78

El costo por depreciación resultado de utilizar la máquina de ensayos de espiga sobre disco marca GUNT HAMBURG, modelo TM260, con un costo de \$5,000.00, para el cálculo de depreciación considerando su quinto año de uso de vida se tiene:

$$D_p = \frac{\$72,000.00 - (\$72,000.00 * 80\%)}{8}$$

$$D_p = \$166.67$$

Se ensayarán los 36 discos, por lo tanto, la depreciación por disco es de:

$$D_p = \$4.63$$

Para el tiempo de uso del local donde se realizaron los ensayos de desgaste se consideran distancias de deslizamiento de 2,000 m y 1,000 m lo cual tomará un tiempo alrededor de 5 h y 33 min para los discos con distancia de 2,000 m y 2 h y 46 min por cada disco de distancia de 1,000 m. Para ensayar 38 discos, esto implica un tiempo de 8,982 min (6.24 días), el costo del local sería de \$15.00 y el costo de local por disco ensayado es de **\$1.25**. Considerando también un día de consumo eléctrico, el costo por iluminación es de **\$0.25**. Resumiendo, estos costos de ensayo se presentan en la Tabla 4.11. Además, en la Tabla 4.12 se presentan los costos totales por cada disco.

Tabla 4.11. Detalle unitario de los distintos costos de utilización de 1 equipo para estudio de desgaste tipo espigas sobre disco.

Actividad	Costo por disco, \$
Depreciación	4.63
Consumo energético	0.25
Costo local	1.25
Costo total disco preparado:	6.13

Tabla 4.12. Total, costos totales de depreciación, local y servicios básicos por disco.

Descripción	C/T, \$
Depreciación de torno	0.15
Depreciación de rectificadora	0.01
Energía para maquinado	0.30
Energía para rectificado	0.11
Consumibles para el maquinado	1.77
Lijado grueso y fino	21.53
Mano de obra	6.66
Local para maquinados	3.13
Energía horno	0.51
Depreciación cortadora	2.08
Depreciación durómetro	50.00
Local para ensayos	1.50
Energía para ensayos	0.02
Depreciación maquina ensayo de desgaste	4.63
Local para ensayo de desgaste	1.25
Subtotal:	93.65

4.3. COSTO DE LA MANO DE OBRA DE LA INVESTIGACIÓN

Para tener en consideración los costos de mano de obra requerida para las diferentes actividades se tomará en base a una remuneración diaria de \$20.00. Se considera que la persona trabaja menos de las 8 h diarias, siempre se le recompensara el día completo. Para tener una referencia al salario por h se calculará de la siguiente manera:

$$\text{Salario por hora} = \frac{\text{Salario diario}}{\text{Horas de trabajo}}$$

$$\text{Salario por hora} = \frac{\$20.00}{8}$$

$$\text{Salario por hora} = \$2.50$$

4.3.1. COSTO DE PREPARACIÓN DE LA MEZCLA CARBÓN VEGETAL-ACTIVADOR

Para la preparación de la mezcla de carbón vegetal se toma como parámetro el tiempo máximo que se puede demorar un operario, lo cual serian dos h.

Entonces para determinar cuál será el costo se determinará de la siguiente manera:

$$\text{Costo de preparación} = \text{Tiempo empleado} * \text{Salario por Hora}$$

$$\text{Costo de preparación} = (2 \text{ horas}) * (\$2.50 \text{ por hora})$$

$$\text{Costo de preparación} = \$5.00$$

Se le recompensara al operario el día completo, por lo tanto:

$$\text{Costo de preparación} = \$20.00$$

4.3.2. COSTO DE FABRICACIÓN DE LA CAJA PARA LA CEMENTACIÓN

Para la fabricación de la caja se debe considerar los cortes de la lámina y el proceso de soldadura, esto podría variar según la experiencia del operador, para esta investigación se considera que la persona que realizará el trabajo es alguien hábil por lo que el trabajo de fabricación de la caja le tomara cuatro h de trabajo. Por lo tanto, el costo se determina de la manera siguiente:

$$\text{Costo de fabricación de la caja} = \text{Tiempo empleado} * \text{Salario por Hora}$$

$$\text{Costo de fabricación de la caja} = (4 \text{ horas}) * (\$2.50 \text{ por hora})$$

$$\text{Costo de fabricación de la caja} = \$10.00$$

$$\text{Costo de fabricación de la caja} = \$20.00$$

4.3.3. COSTO DE MANO DE OBRA DE PREPARACIÓN DE DISCOS PARA CEMENTACIÓN

Para obtener el tiempo de preparación de los discos se consideran los diversos trabajos para obtener la calidad y dimensiones que se necesitan, dentro de estos trabajos se encuentran (corte, refrentado, rectificado, lijado grueso). Se realizan las actividades de cilindrar, cortar, refrentar, lijar en 8 h por dos operarios, luego se consideran otras dos semanas para el lijado grueso de los discos siempre considerando dos operarios. Por lo tanto, se estiman 16 h para un operario y 32 h para ambos para realizar todo el trabajo de preparación de discos. El costo se determina de la manera siguiente:

Costo de preparación discos = Tiempo empleado total * Salario por h

Costo de preparación discos = 32 h * \$2.50 por h)

Costo de preparación discos = \$80.00

4.3.4. COSTO DE MANO DE OBRA DEL PROCESO DE CEMENTACIÓN

Se considera el tiempo de la fabricación de discos y espigas a partir de la materia prima, garantizar dimensiones, y limpieza necesaria para cada disco que se someterá a ensayo.

Antes de pasar al proceso de cementación, se desengrasan las superficies de las piezas tomando en consideración que una de las tareas de los operarios es asegurar la estabilidad dimensional y calidad superficial, se recomienda que las piezas sean lavadas antes de la cementación utilizando una solución de soda caustica industrial al 3-5%. Para ello, las piezas se deben sumergir en un depósito con esta solución durante 5 min.

El costo de mano de obra para la cementación incluye agregar el carbonato de bario (BaCO_3), junto con el carbón vegetal en relaciones de 80:20 en porcentajes en peso.

Considerando terminar todos los discos en 3 días de trabajo en los cuales se espera disponer de la ayuda de 2 operarios en cada turno de 8 h de trabajo. Dentro de este tiempo, considerando 30 min para desengrasado con soda cáustica y secado, 1 h para introducir 18 discos en la caja junto al carbón vegetal y carbonato de bario (BaCO_3),

sellado de caja con arcilla, monitoreo constante de horno y enfriado dentro de horno, se tiene:

$$\text{Costo mano de obra p. cementación} = 2 * \$ 2.50 \text{ por hora} * 24 \text{ h}$$

$$\text{Costo mano de obra p. cementación} = \$120.00$$

4.3.5. COSTO DE MANO DE OBRA DE PREPARACIÓN DE DISCOS PARA CARACTERIZACIÓN Y ENSAYOS

El costo para la medición de propiedades y caracterización de los discos considerando cortar estos con un corte de sección transversal en un tiempo de 2 h para los 4 discos, así mismo embutirlos 10 min para cada uno dando como resultado 3 h, luego el lijado y pulido.

Las superficies de los discos antes del desbaste están oxidadas o con rayas muy anchas y profundas. Se lija la superficie de los discos mediante una serie de papeles abrasivos cada vez más finos en los que se suelen realizar con agua para remover las partículas desprendidas que pueden actuar como abrasivos, se espera realizar esta tarea en 2 h por disco. El tiempo de mano de obra que se espera invertir en el proceso de pulido es de una 1 h. Entonces el costo de la mano de obra para 2 operarios que utilizan estas máquinas es:

$$\text{C. mano de O. preparación de discos para caracterización} = 2 * \$ 2.50 \text{ por hora} * 8 \text{ h}$$

$$\text{C. mano de O. preparación de muestras para caracterización} = \$40.00$$

4.3.6. COSTO DE MANO DE OBRA DE LA CARACTERIZACIÓN

Para la caracterización de los discos que incluye la determinación de propiedades de dureza superficial y profundidad de la capa cementada se utiliza un durómetro Innova test VERZUS 750cd, y un microscopio AmScope Led 144s.

Se considera que cada disco conlleva una h para realizar la prueba de dureza, es decir 4 h en total, y para la determinación de la profundidad del cementado serian 30 min, es decir 2 h para 4 discos. También, se consideran 2 operarios para realizar todo el proceso.

Costo de mano de obra preparación de la caracterización = \$ 2.50 por h * 2.5h

Costo de mano de obra preparación de la caracterización = \$6.25

Se le remunerará con el día completo a ambos operarios por lo tanto este costo será:

Costo de mano de obra preparación de la caracterización = \$40.00

4.3.7. COSTO DE MANO DE OBRA DE LOS ENSAYOS DE DESGASTE

El costo de la mano de obra de los operarios que manipulan la máquina de desgaste tipo espiga sobre disco se determina con los datos de una máquina de ensayo de espiga sobre disco marca gunt HAMBURG, modelo TM260, para el tiempo de uso asumiendo una distancia de deslizamiento de 1,000 m tomaría alrededor de 166 min y para una distancia de deslizamiento de 2,000 m serian 333 min por disco, para ensayar 36 discos, esto implica un tiempo de 149.7 h. El resumen de los costos de mano de obra para la preparación de los discos y la realización de los ensayos de desgaste se presenta en la Tabla 4.13.

Costo de mano de obra de los ensayos de desgaste = 2*\$2.50 por h*149.7 h

Costo de mano de obra de los ensayos de desgaste = \$748.5

Tabla 4.13. Total, de costos de mano de obra.

Descripción	C/T, \$
Preparación de mezcla para cementar	20.00
Fabricación de caja para cementar	20.00
Preparación de discos para cementación	80.00
Cementación	120.00
Preparación de muestras para caracterización	40.00
Caracterización	40.00
Ensayo de desgaste	748.50
Subtotal:	1,068.5

4.4. RESUMEN DE LOS COSTOS DE LA INVESTIGACIÓN

En esta parte de la investigación se presenta el resultado final en términos de costos, luego de tomar en consideración los costos de la materia prima, los costos por depreciación y servicios básicos que requiere toda la parte de tratamiento y ensayos. Ver Tabla 4.14.

Tabla 4.14. Cuadro resumen de los costos de la investigación.

Costos	C/T, \$
Total, costo de materia prima	990.89
Total, de costos totales de, depreciación, local y servicios básicos.	3,371.40
Total, de costos totales de mano de obra.	1,068.50
Subtotal:	5,430.79

Este cuadro resalta una estimación bastante acertada de lo que una investigación de este tipo conlleva, sin embargo, los costos reales podrían aumentar debido a variantes eventuales y algunos aspectos que surgen en la realidad, para este caso en particular y por el tipo de investigación los costos reales que asumen los estudiantes al realizar la investigación son únicamente los costos de materia prima de un total de \$990.89 ya que los otros costos son absorbidos por la Universidad de El Salvador.

CONCLUSIONES

- Que la pérdida de masa entre los discos de acero SAE 3115 y espigas SAE O1 es menos al valor obtenido cuando se utilizan discos con cementación con post-tratamiento térmico de temple y revenido a 200 °C, lo cual indica que el acero SAE 3115 es más resistente al desgaste; por el contrario, si se utilizan discos con cementación sin post-tratamiento térmico la pérdida de masa obtenida es menor al obtenido durante los ensayos de acero SAE 3115 sin cementar, lo cual indica que bajo estas nuevas condiciones los discos cementados son más resistentes al desgaste y se desempeñan mejor en la prueba de desgaste.
- Que el coeficiente de fricción entre los discos de acero SAE 3115 y espigas SAE O1 es inferior al valor obtenido cuando se utilizan discos con cementación con post-tratamiento térmico de temple y revenido a 200 °C, esto inicialmente sugiere una modificación en el modo de desgaste; por el contrario, si se utilizan discos con cementación sin post-tratamiento térmico el coeficiente de fricción observado a lo largo del ensayo es similar al obtenido durante los ensayos de acero SAE 3115 sin cementar, indicando el mismo modo de desgaste.
- Que en las primeras etapas de los ensayos de desgaste comprendidas entre los 0 y 200 m se observa un incremento en el coeficiente de fricción, luego este comportamiento se estabiliza después de los 200 m porque ya se ha terminado una etapa de acoplamiento o estabilización en el contacto entre la espiga y el disco giratorio en el ensayo, luego de esta etapa se observa una variación más constante en los valores presentados del coeficiente de fricción en el ensayo para ambos casos tanto como para discos sin y con cementación.

- Que el desgaste y la pérdida de masa presentada por los ensayos a medida que se aumenta la distancia de deslizamiento es mayor de tal modo que en los ensayos, para ambos tipos de discos, los ensayos a 2,000 m son los que más presentan pérdida de masa, de la misma manera en las espigas, las que se usaron en ensayos a 2,000 m son las que más presentan pérdida de masa.
- El espesor obtenido en los discos con tratamiento termoquímico de cementación fue en promedio de 1.532 mm, lo cual implica que el proceso de tratamiento fue efectivo, conforme a la mezcla carburante utilizada y el tiempo utilizado en el tratamiento.
- El resultado presentado del post-tratamiento de temple y revenido fue que en los discos estudiados reflejan una microdureza Vickers promedio de 470.5 HV en los discos del bloque inferior, y 354.1 HV en los discos del bloque superior, con énfasis en los valores de dureza presentados en las mediciones son altos en las capas más alejadas del interior del material, y disminuyen a medida que se acercó con las lecturas de dureza al interior del material.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y OTRAS FUENTES

- [1] Lajtin, Y., y Arzamasov, B. (1985). Tratamiento químico-térmico de los metales. Moscú URSS.
- [2] Pérez, J. P. (1996). Tratamientos térmicos de los aceros. (Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León) <http://eprints.uanl.mx/435/1/1020115008.PDF>
- [3] Apraiz, J. (1974) Aceros especiales y otras aleaciones (6^a ed). Madrid, España.
- [4] Avner, S. (1964). Introducción a la metalurgia física (1.^a ed.). New York, Estados Unidos. McGraw-Hill.
- [5] Rabinowicz, E. (1964). Fricción y desgaste de materiales (1.^a ed.). Massachusetts, Estados Unidos.
- [6] Stachowiak, G.W. (2005). Desgaste en materiales, mecanismos y práctica (1.^a ed.). M.J. Neale. T.A. Polak y M. Priest (Editores).
- [7] Jost, P. (2005). Departamento de Educacion y Cienci. <https://api.parliament.uk/historic-hansard/written-answers/1966/aug/11/jost-report>
- [8] Dowson, D. (1998). History of tribology. London, Inglaterra.
- [9] Reti, L. (1967). Los códices de Leonardo da Vinci en la Biblioteca Nacional de Madrid (Vol. 8). <https://www.istor.org/stable/3102112>
- [10] MacCurdy, E. (1938). Los cuadernos de Leonardo da Vinci. (Vol. 1). <https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.283547/page/n19/mode/2up>
- [11] Guter, R.T. (1930). La ciencia temprana en Oxford. (vols. VI, VII) <https://archive.org/details/earlyscienceinox05gunt/page/n5/mode/2up>
- [12] Amontons, G. (1699). De La resistencia provocada en las máquinas, Memorias de la Real Academia. (pp. 257-282). https://www.researchgate.net/figure/Excerpts-from-the-memoir-of-Amontons-De-la-resistance-causee-dans-les-machines-of_fig1_276501728
- [13] Desaguliers, J.T. (1734). Un curso de filosofía experimental. (Vol. I). https://www.academia.edu/35319009/Desagulier_J_T_A_Course_of_Experimental_Philosophy_Vol_2_1744_pdf
- [14] OECD. (1969). Glossary of terms and definitions in the field of friction, wear and lubrication-tribology. París: OECD.
- [15] Hirn, G. A. (1854). Sobre los principales fenómenos que presentan fricción mediada. (Vol. 28). (pp. 128-134). Bull. Soc. Ind. Mulhouse
- [16] Abbot, E.J., y Firestone, F.A. (1993) Especificación de la calidad de la superficie, Mech. Engr's.
- [17] Greenwood, J. A. & Williamson, J.B.P. (1996). Contacto de superficies nominalmente planas. Proc. R., London.
- [18] ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [19] Laurel (*Cordia alliodora*). (s/f). BSF – CATIE. <http://bsf.catie.ac.cr/listing/laurel-cordia-alliodora-1965619175.html>
- [20] Catie.ac.cr. Guacimo ulmifolia Lam, ESPECIE DE ARBOL DE USO MULTIPLE EN AMÉRICA CENTRAL. https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/2253/Guacimo_Guazuma_ulmifolia.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- [21] Variables que afectan el proceso de desgaste. (s/f). 1 Library.co. <https://1library.co/article/variables-que-afectan-el-proceso-de-desgaste.qmjrej7q>
- [22] Sarkar, A. D. (1990). Desgaste de Metales. México D.F.; México: Limusa.
- [23] Normativa ASTM, American Society for Testing and Materials, G99 Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus
- [24] García Ramírez, G.R. G. (2017) Estudio de desgaste tipo espiga sobre disco, utilizando un acero 1020 cementado y un acero O1. Universidad de El Salvador. <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/15155/>
- [25] Laboratorio de Recubrimientos duros y Aplicaciones industriales (RDAI) Equipo de laboratorio Tribómetro. (s.f.). <https://rdai.univalle.edu.co/equipotribometro.html>
- [26] Interempresas. (s. f.). *Caracterización del desgaste y la fricción superficial*. Interempresas. <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/5651-Caracterizacion-del-desgaste-y-la-friccion-superficial.html>
- [27] Ficha técnica AISI/SAE 3115. (s. f.). <http://www.ferrumaceros.com>. <http://www.ferrumaceros.com/assets/files/Ficha-AISI3115.pdf>
- [28] El Salvador. (2002). Ley forestal N° 852, Gobierno de El Salvador. [file:///C:/Users/50376/Downloads/LEY FORESTAL%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/50376/Downloads/LEY_FORESTAL%20(2).pdf)
- [29] Artiga Domínguez, J.C., Hernández Galdámez, L.M., y Mezquita Salazar, D.V. (2002). Elaboración de un manual para la selección de variables del proceso de cementación sólida. Universidad de El Salvador. El Salvador. <https://oldri.ues.edu.sv/id/eprint/32854/>
- [30] Staia, M.H. (2013). Desgaste por deslizamiento de recubrimientos a-C contra alúmina en medios corrosivos. [Staia et al \(DRM\) 2013.pdf](#)