

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



**CURSO DE ESPECIALIZACIÓN EN:
INGENIERÍA DE SUPERFICIES**

**ESTUDIO DE DESGASTE EN ACERO SAE 1020 CON Y SIN
CEMENTACIÓN SÓLIDA UTILIZANDO CARBÓN VEGETAL
DE CAFÉ**

PRESENTADO POR:
**CHRISTOPHER STEVEN AGUILAR MACHADO
MAURICIO ENRIQUE CERÓN MELGAR
FRANCLIN ISAAC FLORES VENTURA**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, MAYO DE 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 :

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

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

CURSO DE ESPECIALIZACIÓN EN: INGENIERÍA DE SUPERFICIES

Trabajo de Aplicación previo a la opción al Grado de:
INGENIERO MECÁNICO

Título:

**ESTUDIO DE DESGASTE EN ACERO SAE 1020 CON Y SIN
CEMENTACIÓN SÓLIDA UTILIZANDO CARBÓN VEGETAL
DE CAFÉ**

Presentado por:

**CHRISTOPHER STEVEN AGUILAR MACHADO
MAURICIO ENRIQUE CERÓN MELGAR
FRANCLIN ISAAC FLORES VENTURA**

Trabajo de Aplicación aprobado por:

Docente asesor:

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

San Salvador, mayo de 2025

Trabajo de Aplicación Aprobado por:

Docente Asesor:

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

Tribunal Evaluador:

F. _____

Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz

F. _____

Ing. Francisco Alfredo De León Torres

F. _____

Ing. Rigoberto Velásquez Paz

ESTUDIO DE DESGASTE EN ACERO SAE 1020 CON Y SIN CEMENTACIÓN SÓLIDA UTILIZANDO CARBÓN VEGETAL DE CAFÉ

Estudiantes: Brs. Christopher Steven Aguilar Machado¹, Mauricio Enrique Cerón Melgar² y Franclin Isaac Flores Ventura³
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. Las espigas utilizadas fueron de acero SAE O1 templadas y revenidas a 200 °C, Los discos de acero SAE 1020 sin y con tratamiento termoquímico de cementación sólida con postratamiento de temple y revenido. Para la cementación sólida se utilizó una mezcla 80:20 de carbón vegetal de café y activador químico de carbonato de bario, respectivamente. El tratamiento termoquímico de cementación se realizó a 900 °C durante 8 h. Posteriormente, a los discos se les realizó un postratamiento térmico de temple en aceite desde 850 °C y el revenido a 200 °C. Las cargas aplicadas durante los ensayos de desgaste fueron de 15, 20 y 25 N, a una distancia de deslizamiento de 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 1.38 mm. Finalmente, se obtuvo una resistencia al desgaste inferior en los discos cementados con postratamiento de temple y revenido con respecto a los discos de material base recocidos debido a que las partículas desprendidas de los discos cementados actuaron como material abrasivo.

Palabras claves: Tratamientos termoquímicos, Cementación, Postratamiento térmico, Desgaste, Coeficiente de fricción y Acero SAE 1020.

1 E-mail: mauricioceron9413@gmail.com

2 E-mail: ranclinisaac@gmail.com

3 E-mail: christophermachado20@outlook.com

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

DEDICATORIA

Dedico este trabajo con todo mi cariño y gratitud a mi familia, especialmente a mi madre, por ser el motor de mi vida. Su esfuerzo, sacrificio y amor incondicional me han permitido llegar hasta aquí. Cada paso que he dado ha sido con ella en mente, con la esperanza de devolverle, aunque sea en parte, todo lo que ha hecho por mí.

A mis hermanos, por su apoyo, por sus palabras de aliento y por demostrarme que en la familia siempre encontramos refugio y motivación. A mis abuelos, por su sabiduría y sus enseñanzas, que han marcado mi camino con valores y principios invaluable.

A mis amigos y seres queridos, que han estado presentes en cada momento importante, brindándome su apoyo, compañía y consejos sinceros. Gracias por hacer este viaje más llevadero y por ser una fuente constante de inspiración y alegría.

Dedico este trabajo a todas las personas que creen en la educación como una herramienta de transformación. A aquellos que, con esfuerzo y constancia, persiguen sus sueños a pesar de los obstáculos. Que este logro sea un recordatorio de que, con dedicación, todo es posible.

Finalmente, lo dedico a mí mismo, por no rendirme, por superar los desafíos y por demostrarme que soy capaz de alcanzar mis metas. Este es solo el comienzo de un nuevo camino, y lo afronto con gratitud y determinación.

Christopher Steven

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi padre que me enseñó a encontrar gratificación en la perseverancia, el trabajo, disciplina y esfuerzo siendo este siempre bien recompensado. También, a mis compañeros de estudio quienes me acompañaron en las largas batallas académicas, trabajando en equipo y teniendo como propósito común el desarrollo individual y colectivo de cada uno, ellos también creyeron siempre en mis capacidades motivándome a fortalecer mi carácter mediante su apoyo y mostrándome su admiración con cada nuevo aprendizaje adquirido. Así mismo a Dios que siempre me da la fortaleza y energía necesaria para cumplir con cada una de mis metas.

Mauricio Enrique

DEDICATORIA

Este logro es un tributo al amor y sacrificio que han marcado mi vida, a mis padres, por su valentía al buscar un futuro mejor, su esfuerzo es mi inspiración, a mi tía, cuyo cuidado y dedicación desinteresada fueron fundamentales en mi formación, su apoyo incondicional me ha convertido en quien soy hoy, a mi esposa, mi compañera desde de ya hace muchos años, su presencia constante y su apoyo inquebrantable durante mi etapa universitaria fueron mi mayor fortaleza. Este triunfo lo dedico a ustedes, pilares de mi vida, sin cuyo amor y apoyo nada de esto habría sido posible.

Franklin Isaac

AGRADECIMIENTOS

Al llegar al final de esta etapa tan significativa en mi vida, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que, de una u otra manera, han sido parte de este camino. Este logro no es solo mío, sino también de quienes me han apoyado, alentado y acompañado en cada paso.

En primer lugar, a Dios, por darme la fortaleza, la paciencia y la sabiduría para afrontar los desafíos que se presentaron en el trayecto. Su guía ha sido mi luz en los momentos más difíciles y mi impulso en aquellos en los que dudé de mí mismo.

A mi familia, que ha sido mi mayor pilar, cuyo amor, sacrificio y apoyo incondicional me han dado la oportunidad de llegar hasta aquí. Su esfuerzo diario y sus palabras de aliento han sido la base sobre la cual construí este sueño. A mi madre, por su compañía, su cariño y por recordarme siempre que los logros se disfrutan más cuando se comparten con quienes amamos. A mi padre, abuelos, tíos y hermanos, por ser parte de mi historia y por enseñarme, con su ejemplo, el valor del trabajo y la perseverancia.

A mis profesores y mentores, quienes han sido guías esenciales en este proceso. Gracias por compartir su conocimiento, por sus palabras de motivación y por brindarme herramientas valiosas que van más allá del aula de clases. Su dedicación y compromiso con la enseñanza han dejado en mí una huella imborrable.

A mis amigos y compañeros, con quienes compartí innumerables momentos de esfuerzo, aprendizaje y crecimiento. Gracias por las risas en los momentos de descanso, por el apoyo en los días difíciles y por demostrarme que la amistad es un motor que impulsa a seguir adelante.

A todas las personas que, de una u otra forma, me brindaron su apoyo, su tiempo y sus consejos, gracias. Cada palabra de aliento, cada gesto de ayuda y cada enseñanza han contribuido a que este sueño se haga realidad.

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.

Christopher Steven

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por cada reto que oportunamente me permite superarme; así también, le agradezco el permitirme culminar otra etapa más de manera satisfactoria y darme la oportunidad de continuar emprendiendo camino en mi vida profesional.

Agradezco a mi padre por brindarme los recursos necesarios para mi desarrollo y por recordarme constantemente la importancia de culminar cada proyecto dando siempre y en todo lo mejor.

Agradezco a mis docentes, en especial al Dr. Jonathan Berríos por cada una de sus enseñanzas en mi formación superior y profesional, cada aprendizaje adquirido aportó una parte esencial en mi proceso de desarrollo profesional, agradezco por continuamente exhortarme a investigar y no dejar atrás cada uno de los principios aprendidos en las diferentes asignaturas, estos forman los pilares de la comprensión y permiten progresar abriendo camino en el mundo de la ciencia, el desarrollo, así como fomenta el pensamiento crítico y analítico en la gestión y resolución de problemas.

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.

Mauricio Enrique

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi sincero agradecimiento a mis maestros de la universidad, cuya erudición y dedicación han sido fundamentales en mi desarrollo académico. Asimismo, extendiendo mi gratitud a mis compañeros de universidad, quienes no solo me brindaron su camaradería, sino que también contribuyeron significativamente a mi aprendizaje al ayudarme a comprender y sobrellevar las tareas y proyectos, así como a adaptarme a nuevos ambientes durante estos años de formación

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.

Franklin Isaac

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
Introducción.....	..1
1. Marco teórico.....	..2
1.1. Tribología.....	..2
1.1.1. Fricción.....	..3
1.2. Desgaste.....	..4
1.2.1. Adhesión.....	..5
1.2.2. Abrasión.....	..8
1.2.3. Reacción triboquímica.....	13
1.2.4. Fatiga superficial.....	14
1.3. Estudios de desgaste.....	16
1.4. Tipos de desgaste.....	16
1.5. Tipos de máquinas para realizar ensayos de desgaste.....	18
1.6. Métodos de ensayos de desgaste.....	21
1.7. Métodos para determinar el desgaste.....	24
1.8. Tratamientos térmicos como mecanismo de control de desgaste.....	24
1.8.1. Recocido total.....	25
1.8.2. Recocido para eliminación de esfuerzos.....	29
1.8.3. Recocido de proceso.....	30
1.8.4. Normalización.....	30
1.8.5. Temple.....	32
1.8.6. Tratamiento térmico superficial.....	34
1.8.7. Cementación.....	36
1.8.8. Tratamiento térmico después de la cementación.....	41
2. Diseño experimental.....	43
2.1. Dimensionamiento de probetas seleccionadas para los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco.....	44
2.2. Conformado de probetas.....	45
2.3. Diseño de caja de cementación.....	47
2.4. Tratamiento térmico de recocido.....	49
2.5. Tratamiento termoquímico de cementación sólida utilizando carbón vegetal.....	50
2.6. Tamizado y secado del carbón vegetal.....	50
2.7. Preparación de la pieza a cementar y cementación sólida utilizando carbón vegetal.....	51
2.8. Templado de espigas.....	52
2.9. Postratamiento térmico a la cementación.....	53
2.10. Preparación previa al ensayo de desgaste tipo espiga sobre disco.....	53
2.11. Ensayo de desgaste tipo espiga sobre disco.....	55

	Pág.
3. Resultados y análisis de resultados.....	60
3.1. Resultados de los ensayos de desgaste.....	60
3.2. Determinación del espesor de capa cementada.....	69
3.3. Determinación de dureza.....	69
3.4. Análisis de resultados.....	71
Conclusiones.....	72
Referencias bibliográficas.....	74

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Microestructuras óptimas de los aceros para maquinado con diferentes contenidos de carbono [7].....	32
Tabla 1.2. Profundidad de la porción externa en pulgadas al cementar [6].....	38
Tabla 2.1. Composición química de los aceros a estudiar en condiciones de entrega.....	46
Tabla 2.2. Maquinado de discos y espigas.....	46
Tabla 2.3. Proceso de cementación sólida	51
Tabla 2.4. Temple de espigas.....	52
Tabla 2.5. Variables bajo las que se realizan los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco acero SAE 1020 no cementado.....	57
Tabla 2.6. Variables bajo las que se realizan los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco acero SAE 1020 cementado	57
Tabla 3.1. Pérdida de masa en discos recocidos ensayados con espiga de acero SAE O1 templadas a 815 °C y revenidas a 200 °C.....	61
Tabla 3.2. Pérdida de masa en discos cementados ensayados con espiga de acero SAE O1 templadas a 815 °C y revenidas a 200 °C.....	61
Tabla 3.3. Pérdida de masa en espigas ensayadas en discos recocidos.....	61
Tabla 3.4. Pérdida de masa en espigas ensayadas en discos cementados.....	62
Tabla 3.5. Valores de dureza Rockwell C obtenidos en discos de acero SAE 1020 con tratamiento termoquímico de cementación sólida, con postratamiento térmico de temple y revenido.....	70

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1. Esquema de los cuatro mecanismos principales de desgaste: a) Adhesión; b) abrasión; c) reacción triboquímica; y d) superficie bajo condición de fatiga [2].....	4
Fig. 1.2. Mecanismos de adhesión: a) Teoría de entrelazamiento mecánico; b) teoría de difusión; c) teoría electrónica; y d) teoría de absorción [2].....	6
Fig. 1.3. Sistemas tribológicos afectados por el desgaste abrasivo [2].....	9
Fig. 1.4. Desgaste abrasivo en función de la relación de dureza de las partículas abrasivas a dureza del material desgastado [2].....	10
Fig. 1.5. Interacciones entre minerales abrasivos y superficies de aceros: a) microsurcamiento; b) micro corte; y c) micro agrietamiento [2].....	11
Fig. 1.6. Interacciones físicas entre partículas abrasivas y las superficies de los materiales: a) Micro inserción; b) micro corte; c) micro fatiga; y d) micro agrietamiento [2].....	12
Fig. 1.7. Fotomicrografías del surcamiento de un acero suave por protuberancias de acero duro con diferentes ángulos de ataque: a) 30°; b) 60°; y c) 90° [2].....	13
Fig. 1.8. Picaduras sobre la superficie de un acero cementado, endurecido a 60 HRC [2].....	14
Fig. 1.9. Formación y propagación de grietas por fatiga superficial según condición de esfuerzo: a) Esfuerzo normal y fricción superficial; b) Esfuerzos combinados y fricción superficial; y c) fricción superficial con carga normal distribuida [2].....	15
Fig. 1.10. Espiga sobre mesa oscilante [4].....	18
Fig. 1.11. Máquina de espiga sobre buje [4].....	19
Fig. 1.12. Cilindros cruzados [4].....	19
Fig. 1.13. Máquina de espiga sobre cilindro [4].....	20
Fig. 1.14. Máquina de espiga sobre disco [4].....	22
Fig. 1.15. Aparato espiga sobre disco [5].....	23
Fig. 1.16. Aparato Taber [5].....	23
Fig. 1.17. Diagrama de equilibrio hierro-carburo de hierro marcado con los nombres comunes para las estructuras [6].....	27
Fig. 1.18. Esquemas de los cambios en microestructura durante el recocido de un acero al 0.20% de C: a) Estructura original, ferrita y perlita de grano grueso; y b) justo por encima de la línea A ₁ ; la perlita se ha transformado en pequeños granos de austenita y la ferrita no ha cambiado c) por encima de la línea A ₃ ; solo austenita de grano fino d) después de enfriar a temperatura ambiente; ferrita de grano fino y pequeñas áreas perlíticas [6].....	28
Fig. 1.19. Intervalo de recocido, normalizado y temple para ceros al carbono [6].....	29
Fig. 1.20. Acero normalizado al 0.50% de C, calentado a 1,800 °F y enfriado en aire; 100x. Las áreas perlíticas están rodeadas por ferrita proeutectoide [7].....	31
Fig. 1.21. Esquema que se presenta la diferencia en estructura perlita, debido al recocido y al normalizado [7].....	31
Fig. 1.22. Variación de las constantes reticulares a/c de la martensita con el contenido del carbono en los aceros al carbono [6].....	33
Fig. 1.23. Estructura llamada martensita, 2,500x [6].....	34
Fig. 1.24. Acero al carbono al 1% templado al agua, atacado químicamente con nital al 2%, 750x Nódulos de martensita están retenidos en la matriz de austenita [6].....	34

	Pág.
Fig. 1.25. Acero al carbono al 1% templado al agua, atacado químicamente con nital al 2%, 750x Nódulos de martensita están retenidos en la matriz de austenita [6].....	34
Fig. 1.26. Esquema del porcentaje de martensita formada como función de la temperatura [6].	34
Fig. 1.27. Demostración impresionante de una pala austenizada. El cuadro de la izquierda presenta la extensión a la cual la pala puede ser combada sin que se produzca ninguna falla, y el cuadro de la derecha presenta cómo la pala combada, después de eliminar la fuerza de combado, regresa a su posición original sin deformación aparente [6].....	35
Fig. 1.28. Tenacidad y ductilidad mejoradas de varillas austenizadas que se comparan con varillas templadas y revenidas de igual dureza [6].....	36
Fig. 1.29. Profundidad de la porción externa cementada en relación del tiempo y la temperatura de carburización [6].....	38
Fig. 1.30. Gradiente de concentración de carbono en un acero cementado con 0.080 pulg de porción externa [6].....	39
Fig. 1.31. Acero al 0.20% de C, cementado por empaquetamiento a 1,700 °F durante 6 h y enfriado en el horno. Atacado químicamente con nital al 2%, 30x [6].....	41
Fig. 1.32. Capa descarburizada de ferrita sobre la superficie de un acero de alto carbono recocido. Atacado químicamente con nital al 2%, 200x [6].....	42
Fig. 1.33. Engrane apropiadamente cementada, templada y revenido. Atacado químicamente con nital al 2%, 7x [6].....	42
Fig. 2.1. Diagrama de flujo del diseño experimental.....	44
Fig. 2.2. Dimensiones de los especímenes a utilizar en el ensayo tipo espiga sobre disco, cotas en mm [7].....	45
Fig. 2.3. Configuración previa a cementación sólida a) dimensionamiento de caja de cementación, b) distribución y colocación de probetas de acero SAE 1020 en caja de tratamiento termoquímico de cementación sólida y c) medición de masa de carbón vegetal de café necesario para realización de mezcla de carbón + carbonato de bario.....	48
Fig. 2.4. Vista externa y dimensiones de caja de cementación.....	49
Fig. 2.5. Tratamiento térmico de recocido.....	49
Fig. 2.6. Tamizado y secado de carbón vegetal de café.....	50
Fig. 2.7. Postratamiento térmico templado de discos SAE 1020 previamente cementado.....	53
Fig. 2.8. Postratamiento térmico de revenido de discos SAE 1020 previamente templados.....	53
Fig. 2.9. Disco de acero SAE 1020 posterior al proceso de lijado [7].....	54
Fig. 2.10. Balanza semianalítica marca aczet.....	55
Fig. 2.11. Módulo para ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco marca GUNT, TM 260.3..	56
. 2.12. Módulo para ensayos tipo espiga sobre disco con sus principales componentes señalados.....	56
Fig. 3.1. Pérdidas de masa en función de las cargas aplicadas para discos recocido y cementados.....	62
Fig. 3.2. Pérdidas promedias de masa en las espigas	63
Fig. 3.3. Variaciones del coeficiente de fricción de discos recocidos a una carga de 15 N.....	63

	Pág.
Fig. 3.4. Variaciones del coeficiente de fricción de discos recocidos a una carga de 20 N.....	64
Fig. 3.5. Variaciones del coeficiente de fricción de discos recocidos a una carga de 25 N.....	65
Fig. 3.6. Variaciones del coeficiente de fricción de discos cementados a una carga de 15 N...	66
Fig. 3.7. Variaciones del coeficiente de fricción de discos cementados a una carga de 20 N...	66
Fig. 3.8. Variaciones del coeficiente de fricción de discos cementados a una carga de 25 N...	67
Fig. 3.9. Variaciones promedio del coeficiente de fricción de a una carga de 15 N.....	67
Fig. 3.10. Variaciones promedio del coeficiente de fricción de a una carga de 20 N.....	68
Fig. 3.11. Variaciones promedio del coeficiente de fricción de a una carga de 25 N.....	68
Fig. 3.12. Cambio microestructural de dos discos SAE 1020 cementado con carbón vegetal a 980 °C en un periodo de 8 h: a) Cambios microestructurales del disco cementado 1; y b) cambios microestructurales del disco cementado 2.....	69
Fig. 3.13. Medición de dureza de discos cementados: a) distribución de ensayos en dureza realizados en primer disco y b) distribución de ensayos de dureza realizados en segundo disco.....	70
Fig. 3.14. Dureza Rowckwell C en función de la distancia desde la superficie de los discos 1 y 2.....	71

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

ASTM: Organización que crea normas técnicas para materiales

BCC: Cúbica centrada en el cuerpo

F: Carga aplicada

Fe₃C: Cementita

f_f : Fuerza de fricción

HRC: Dureza Rockwell C

r : Radio

S: Distancia de deslizamiento

SAE: Sociedad de Ingenieros Automotrices

t : tiempo

α : Ferrita

γ : Fase austenítica

μ : Coeficiente de fricción

v : Velocidad lineal

ω : Velocidad angular

INTRODUCCIÓN

Históricamente todos los materiales han sufrido cambios en sus geometrías, propiedades físicas, mecánicas, estructurales debido a la interacción con el medio, tales como superficies de apoyo o fricción, medios corrosivos, ambientes salinos, cambios de temperatura, entre otros. Así, durante mucho tiempo se ignoró las causas que provocaban estos cambios en las piezas, desconocer la naturaleza misma implicó costosas pérdidas en mantenimientos, tiempos no productivos, daños irreversibles materiales inclusive en fatalidades humanas.

Los avances científicos históricos y los aportes de diferentes investigadores han podido ir dando explicación a muchos de los problemas expuestos, sumando también las normas, leyes y regulaciones que según cada país, empresa o persona adopta, con el propósito de estudiar el comportamiento de los materiales ante las condiciones a las cuales estará expuesto.

Actualmente se realizan diferentes tipos de ensayos para permitir garantizar con las condiciones mínimas requeridas según las leyes y normas de cada país e instituciones, estos van desde ensayos de tracción, resistencia a la compresión, fatiga, desgaste, dureza, entre otros. Es por ello que existe la necesidad de enriquecer las teorías actuales referentes al desgaste mediante la investigación científica, comprobación de teorías y documentación de dichas investigaciones.

Este documento es un estudio de desgaste en un acero SAE 1020 sin y con tratamiento termoquímico de cementación utilizando carbón vegetal, para el cual se propuso el ensayo de desgaste tipo espiga sobre disco. Partiendo del análisis, documentación y ejecución de un correcto proceso de cementación utilizando carbón vegetal de café al 80% y carbonato de bario al 20%. Seguidamente se estudia y analiza el desgaste de los especímenes utilizando tres condiciones diferentes de cargas aplicadas a una única distancia de deslizamiento para cada condición. Finalmente, se determinan las propiedades de dureza, espesor y coeficientes de fricción para cada probeta con y sin el tratamiento térmico de cementación.

1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta una recopilación bibliográfica sobre conceptos de desgaste, fricción y cementación. Se particulariza con la descripción de los diferentes tipos de desgaste. Se abordan diferentes métodos para realizar estudios de desgaste. También, se presentan información sobre los diferentes tratamientos térmicos volumétricos como superficiales; como también los tratamientos termoquímicos de cementación sólida, líquida y gaseosa. Estos tratamientos utilizados como mecanismos de prevención del desgaste en metales. Además, se particulariza la descripción del proceso de cementación sólida utilizando carbón vegetal y activadores a bases de carbonatos. Finalmente, se presenta un análisis de los posibles tratamientos térmicos posteriores a la cementación.

1.1. TRIBOLOGÍA

La tribología es la ciencia y técnica que estudia la interacción entre superficies en movimiento y los problemas relacionados con ellos: fricción, desgaste y lubricación. En la interacción entre dos superficies surgen diversos fenómenos cuyo conocimiento es de vital importancia [1].

El propósito de la tribología es predecir condiciones de falla por desgaste y a su vez estudiar mecanismos que permitan controlar adecuadamente la resistencia al desgaste. Dependiendo de la situación el propósito a alcanzar puede ser distinto, entre los cuales se pueden citar [1]:

- Mínimo desgaste y mínima fricción: rodamientos, engranajes, levas gracias a la lubricación y las capas de recubrimiento.
- Mínimo desgaste y máxima fricción: frenos, embragues, neumáticos con materiales resistentes al desgaste.
- Máximo desgaste y mínima fricción: lápices, deposición de lubricantes sólidos mediante deslizamiento.
- Máxima fricción y máximo desgaste: borradores.

1.1.1. FRICCIÓN

Efecto que proviene de la presencia de fuerzas tangenciales entre dos superficies sólidas en contacto cuando permanecen unidas por la existencia de esfuerzos normales [1].

Se tiene que distinguir entre dos situaciones:

- A) Fuerza de fricción estática: La necesaria para iniciar el movimiento. Si la fuerza tangencial aplicada es menor a este valor, no existe movimiento y la fuerza de fricción es igual o mayor que la tangencial aplicada.
- B) Fuerza de fricción cinética o dinámica: La necesaria para mantener el movimiento. De valor menor que la anterior.

Las leyes fundamentales de la fricción son:

- La fuerza de fricción es proporcional a la fuerza normal.
- La fuerza de fricción es independiente del área aparente de contacto, ya que objetos grandes y pequeños del mismo par de materiales, presentan el mismo coeficiente de fricción.

La fuerza de fricción teóricamente es independiente de la velocidad de deslizamiento (aunque no es así en la práctica debido a la sensibilidad de los materiales de fricción, a la presión, a la velocidad y a la temperatura). A escala microscópica, las superficies de los sólidos presentan cimas y valles, que se pueden evaluar midiendo su rugosidad. Debido a esta rugosidad cuando dos superficies entran en contacto, no lo hacen en toda el área aparente de contacto, sino que el contacto se logra solo en algunos puntos de estas rugosidades. Estos puntos de contactos son los encargados de soportar la carga normal y de generar la fuerza de fricción [1].

Cuando la carga normal aumenta, el número de puntos en contacto también, incrementando el área real de contacto a pesar de que se mantenga invariable el área aparente [1].

La fuerza de fricción es debida a varios efectos que suponen aportación de energía [1]:

- Adhesión: principal componente de la fricción;
- Deformación; y

- A la interacción entre asperezas.

La existencia de capas contaminantes entre el disco y el material de fricción reduce considerablemente las fuerzas de fricción [1].

La existencia de una fuerza de fricción hace que aumente el área real de contacto y aumenta el barrido de la capa intermedia, aumentando la adhesión respecto al simple contacto [1].

Es importante destacar que, a altas velocidades de deslizamiento de una superficie contra la otra, se aumenta la temperatura debido a la fuerza de rozamiento entre ambos materiales que se oponen al movimiento con lo cual se produce una conversión de la energía cinética en calor (energía térmica) con el consiguiente aumento de la temperatura de ambas superficies [1].

1.2. DESGASTE

Éste consiste en el desprendimiento de material de la superficie de un cuerpo como consecuencia de la interacción con otro cuerpo. De acuerdo con la Norma DIN 50320, existen cuatro mecanismos o combinaciones entre ellos, los cuales están involucrados en todos los procesos de desgaste, tal como se presenta en la Fig. 1.1 [1].

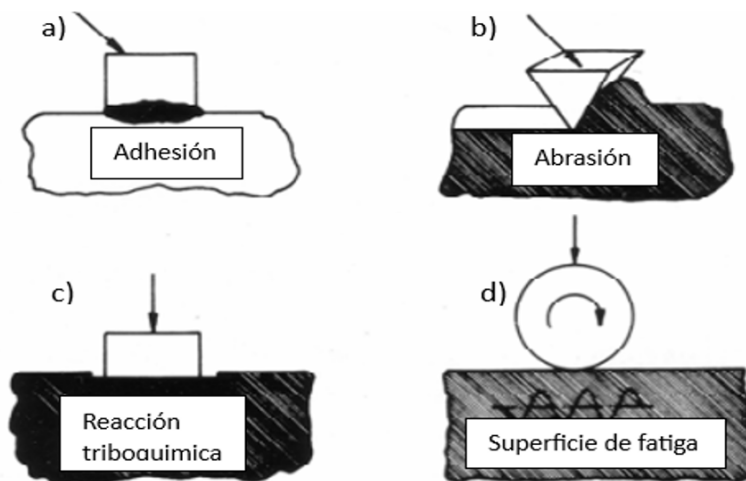


Fig. 1.1. Esquema de los cuatro mecanismos principales de desgaste: a) Adhesión; b) abrasión; c) reacción triboquímica; y d) superficie bajo condición de fatiga [2].

1.2.1. ADHESIÓN

El desgaste adhesivo es la formación y rompimiento de enlaces adhesivos en la interfaz, se puede presentar cuando dos superficies se deslizan una contra otra. Altas presiones localizadas entre las asperezas de contacto producen deformación plástica, adhesión y consecuentemente, formación de juntas localizadas. El deslizamiento relativo entre las superficies en contacto causa la ruptura de esas uniones y por consiguiente la transferencia de material de una superficie a la otra. Con el aumento en el deterioro o la sobre carga debido a esfuerzos, en la velocidad o la temperatura del par deslizante, la adhesión puede causar daño superficial localizado. Esto está relacionado con un gran incremento en el coeficiente de fricción y mayor desgaste. En el caso extremo, las superficies se unen y no existe movimiento relativo entre ellas. La formación de juntas en el contacto local entre superficies puede ser debido a adhesión o cohesión. La cohesión es idealmente efectiva en la soldadura de materiales iguales o similares que produce la desaparición de la interfaz entre las superficies originales. Por otra parte, la adhesión aplica si la interfaz original es preservada en las juntas localizadas [2].

La tendencia a formar juntas por adhesión depende de las propiedades físicas y químicas de los materiales en contacto, el modo y magnitud de la carga, y las características de las superficies tales como contaminación o rugosidad. El contacto entre metales en aire, frecuentemente es no-metálico debido a que las superficies están cubiertas de capas adsorbidas, o películas de óxidos. La adhesión de metales bajo contacto no-metálico es causada principalmente por débiles fuerzas de Van der Waals, fuerzas que son efectivas a distancias menores de 10 μm . Las capas adsorbidas y películas de óxido en las superficies en contacto pueden ser rotas debido a deformaciones elásticas y plásticas de las asperezas. La adhesión en este caso, es causada por enlaces covalentes o metálicos principalmente, el enlace iónico es muy raro en metales. Como las fuerzas de adhesión dependen del área real de contacto, estas fuerzas son influenciadas por la resistencia a la deformación plástica del material y a su estructura cristalina o el número de planos de deslizamiento. Se ha demostrado que la tendencia a la adhesión en metales incrementa de estructuras cristalinas hexagonal de

empaquetamiento compacto (HCP) a cúbica centrada en el cuerpo (BCC) y a cúbica centrada en las caras (FCC) [2].

En la literatura se han presentado muchas teorías de adhesión, no obstante, son cuatro los principales grupos de adhesión aceptados generalmente: a) enganche mecánico, b) teoría de difusión, c) teoría electrónica y d) teoría de adsorción. Estos mecanismos de adhesión se presentan esquemáticamente en la Fig. 1.2 así, en esta figura se presentan algunas consideraciones importantes acerca de estos mecanismos; en adición, se debe considerar una teoría química, así [2]:

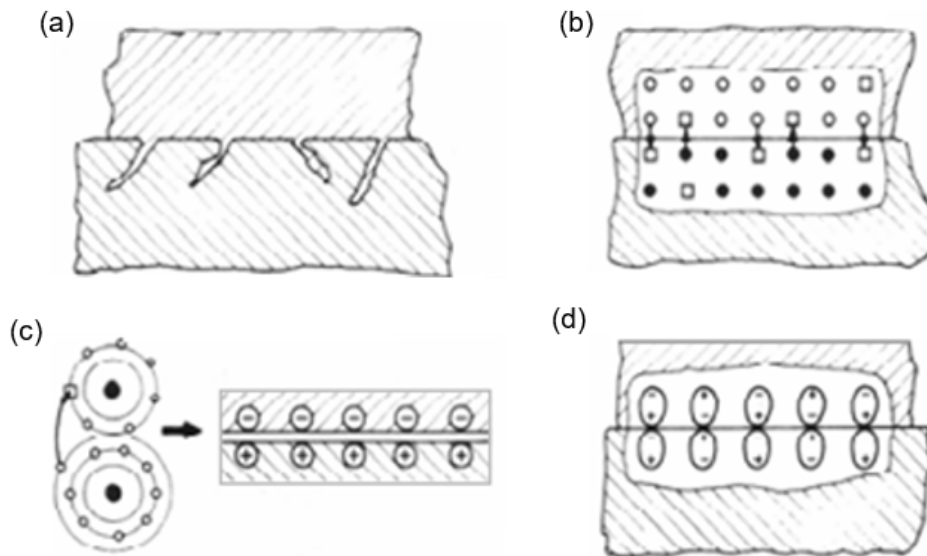


Fig. 1.2. Mecanismos de adhesión: a) Teoría de entrelazamiento mecánico; b) teoría de difusión; c) teoría electrónica; y d) teoría de adsorción [2].

a) Teoría del enganche mecánico

Esta teoría atribuye la adhesión a un enganche por irregularidades de la superficie. La contribución de este mecanismo de adhesión puede ser efectivo en la adhesión de polímeros a textiles, o en el caso de la penetración de un polímero en estado líquido en micro fisuras en superficies metálicas. Mas evidencia del enganche mecánico se ha generado en investigaciones que presentan la influencia de la topografía de la superficie (rugosidad) del substrato sobre la resistencia de la interfaz [2].

b) Teoría de difusión

Esta consiste en que los átomos o moléculas se pueden difundir a través de la interfaz entre dos cuerpos en contacto. Para muchos polímeros, la adhesión se puede causar por mutua difusión de cadenas moleculares o sus segmentos a través de la interfaz. La teoría de difusión requiere que las macromoléculas o segmentos de cadenas de los polímeros posean suficiente movilidad y sean mutuamente solubles. Los mecanismos de difusión se hacen poco probables para polímeros con alta cristalinidad o con cadenas interligadas. La difusión de la interfaz puede contribuir a la adhesión de plásticos amorfos, o a la autoadhesión en elastómeros. Algunos investigadores han mostrado evidencia experimental de la difusión de macromoléculas [2].

c) Teoría electrónica

Propone una transferencia de electrones a través de la interfaz de los cuerpos de contacto con diferentes bandas de estructuras electrónicas. Esta transferencia produce la formación de una doble capa de carga eléctrica en la interfaz. Se supone que la adhesión es causada por fuerzas electrostáticas efectivas a través de la doble capa eléctrica. La transferencia de electrones en la interfaz depende de la naturaleza de los cuerpos en contacto. Un metal en contacto con un polímero actúa como donador de electrones y el polímero se carga negativamente cuando el compuesto se separa. Experimentos recientes han demostrado que la radiación ultravioleta puede cambiar la carga y puede influenciar la resistencia a la adhesión. Esto puede ser una importante contribución a la adhesión de los polímeros [2].

d) Teoría química de adhesión

Establece que se presenta adsorción química en la interfaz de los cuerpos en contacto. En esta interfaz se establecen fuertes enlaces químicos, metálicos, iónicos y covalentes. Debido a estos fuertes enlaces, la adhesión de polímeros a metales puede causar transferencia, por ejemplo, de aluminio a la superficie del polímero al desintegrarse el compuesto. Algunas veces la teoría química es incluida en la teoría de adsorción [2].

e) Teoría de adsorción

Se refiere a la adhesión entre superficies en íntimo contacto intermolecular debido a enlaces secundarios, tales como fuerzas de Van der Waals. Los enlaces secundarios

son mucho más débiles que los enlaces primarios. Además, en los enlaces secundarios se deben distinguir interacciones dipolo-dipolo permanentes, dipolo-dipolo inducidos, fuerzas de dispersión y enlaces de hidrógeno. La contribución de estos enlaces al mecanismo de adhesión entre dos cuerpos en contacto depende de factores como limpieza, topografía de la superficie, carga aplicada, temperatura, ambiente, microestructura del material, entre otros [2].

1.2.2. ABRASIÓN

El desgaste abrasivo es la remoción de material debido a ralladuras por la presencia de partículas duras entre o embebidas en una de las dos superficies en movimiento relativo, o por la presencia de protuberancias duras en una o ambas superficies. Una partícula dura puede ser el producto de procesamiento, por ejemplo, minerales como sílice, alúmina u otros, o un fragmento de desgaste endurecido por deformación, suciedad ajena al tribosistema. Las protuberancias tales como asperezas en superficies maquinadas normalmente pueden actuar como partículas duras si la superficie es mucho más dura que el otro cuerpo [2].

En la Fig. 1.3 se presenta algunos tribosistemas en los cuales la abrasión es el mecanismo de desgaste predominante. Las tolvas, sistemas hidráulicos con suciedad, extrusoras, trituradoras de rocas, dados en metalurgia de polvos, pasadores o cualquier superficie deslizante en la que la superficie del cuerpo de oposición presenta protuberancias o partículas duras embebidas. Diferentes procesos físicos pueden estar involucrados en la abrasión, dependiendo de los materiales en desgaste y de las condiciones de operación tales como el tipo de partículas abrasivas, ángulo de ataque, entre otras [2].

De acuerdo a ciertos investigadores, el desgaste abrasivo ocurre a bajo y alto nivel, dependiendo de la relación de dureza del abrasivo a la dureza de la superficie siendo desgastada. En la Fig. 1.4 se presenta la transición de desgaste de bajo a alto nivel para materiales homogéneos y no homogéneos. No homogéneos, significa un acero cuya matriz incluye carburos duros. El incremento de bajo a alto nivel de desgaste ocurre

para un material homogéneo cuando la dureza del abrasivo es igual a la dureza del material desgastado. A igual dureza de los materiales, la matriz del material conteniendo carburos duros es más suave que la matriz del material homogéneo. La transición de bajo a alto nivel de desgaste de los materiales no homogéneos empieza y termina cuando la dureza de la matriz y la dureza de los carburos (o de manera más general, la dureza de la fase más dura) son excedidas respectivamente por la dureza del abrasivo. Un abrasivo de dureza igual o menor que la superficie en desgaste es llamada “abrasivo suave” y un abrasivo con dureza mayor que la de la superficie en desgaste es llamado “abrasivo duro” [2].

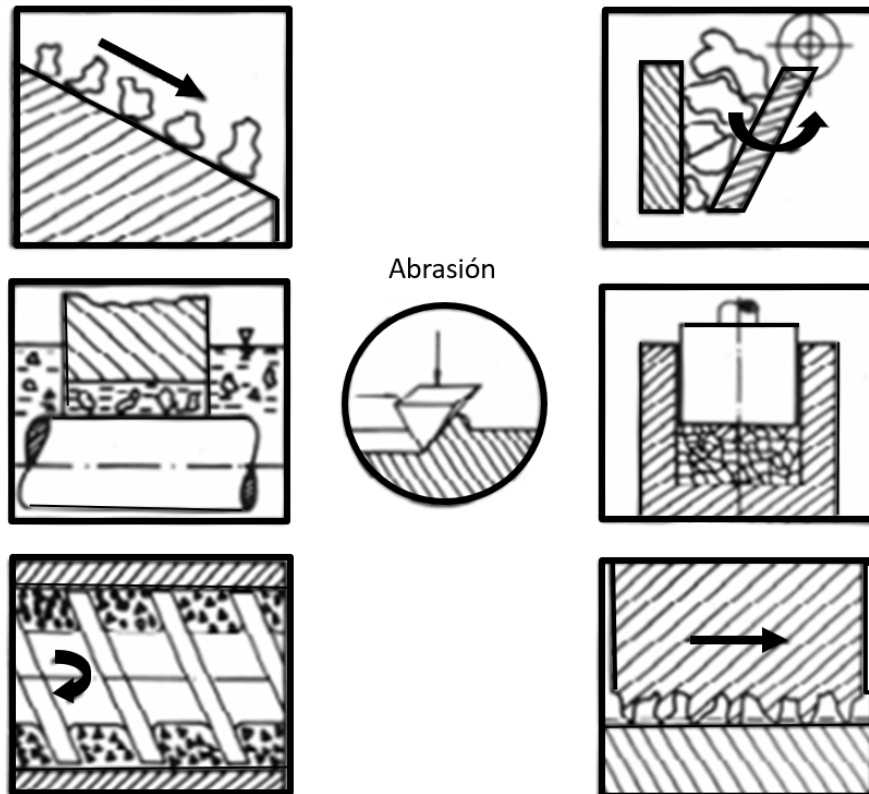


Fig. 1.3. Sistemas tribológicos afectados por el desgaste abrasivo [2].

En la abrasión de dos cuerpos, las partículas abrasivas se mueven libremente sobre la cara de un material, como en el deslizamiento de arena en una tolva o en el dragado de arena o grava. En la abrasión de tres cuerpos, las partículas abrasivas actúan como partículas interfaciales entre el cuerpo sólido y el cuerpo de oposición. Los tornillos sin fin en la extrusión y procesamiento de plásticos que incluyen materiales abrasivos, y

tritadoras de mandíbulas están entre los tribosistemas que son desgastados debido a abrasión de tres cuerpos. El desgaste es de una a dos órdenes de magnitud menor en el desgaste abrasivo de tres cuerpos que en el de dos cuerpos. En la abrasión de tres cuerpos, solo una proporción de las partículas abrasivas causa desgaste debido a las variaciones en el ángulo de ataque. Partículas en deslizamiento o rodamiento libre causan muy poco desgaste [2].

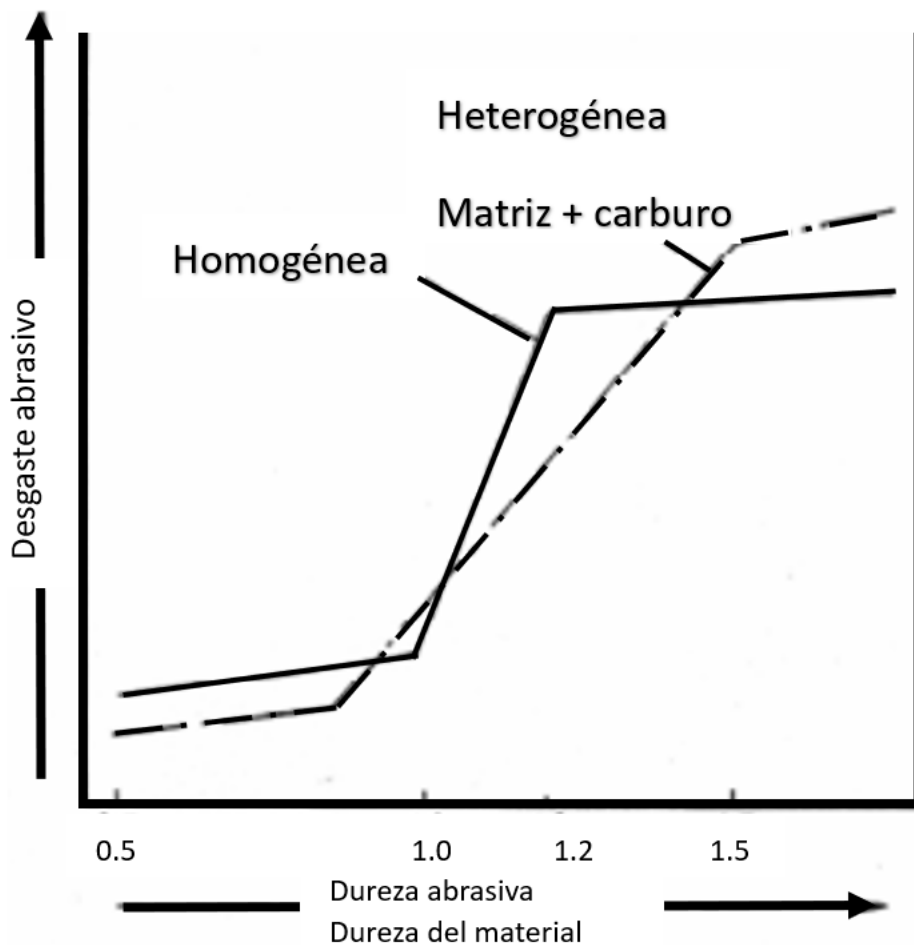


Fig. 1.4. Desgaste abrasivo en función de la relación de dureza de las partículas abrasivas a dureza del material desgastado [2].

En la Fig. 1.5 se presenta microsurcamiento, micro-corte y micro-agrietamiento de la superficie de aceros desgastados por minerales abrasivos duros, es decir, desgaste de alto nivel de acuerdo a la Fig. 1.4. En el caso ideal de microsurcamiento debido a una pasada de una partícula abrasiva, no se presenta desprendimiento de material de la

superficie. Delante de la partícula abrasiva se forma una joroba y hacia los lados se desplaza material continuamente debido al surco producido. Durante el microsurcamiento las pérdidas de material se pueden presentar debido a muchas partículas abrasivas que están actuando simultáneamente o sucesivamente. El material puede ser surcado al lado de otros surcos repetidamente y se puede desprender material por fatiga cíclica. Esto es esquemáticamente mostrado en la Fig. 1.6 El micro-corte puro produce pérdidas de material igual al volumen del surco de desgaste producido [7].

El micro-agrietamiento se puede presentar cuando una alta concentración de esfuerzos es impuesta por las partículas abrasivas, particularmente en la superficie de materiales frágiles. En este caso, grandes fragmentos de desgaste se desprenden de la superficie debido a la formación y propagación de grietas [2].

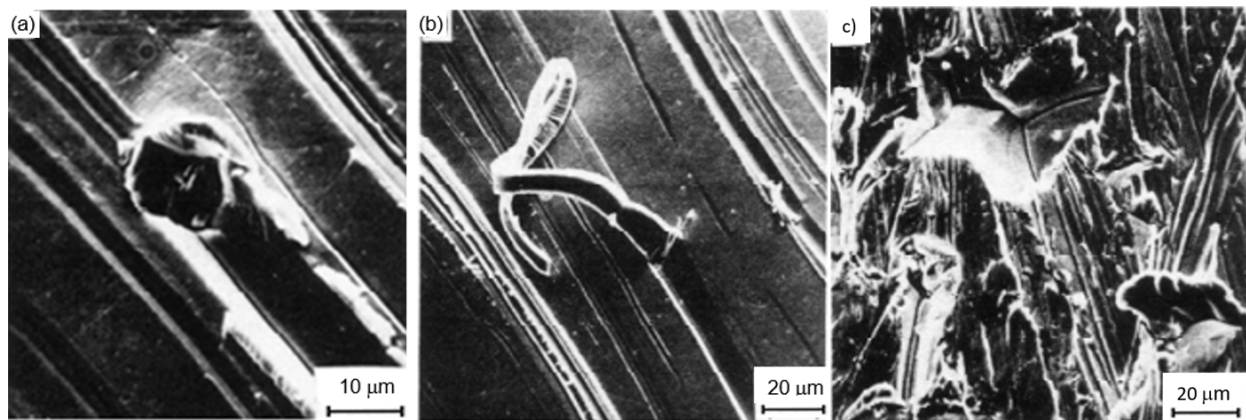


Fig. 1.5. Interacciones entre minerales abrasivos y superficies de aceros: a) microsurcamiento; b) micro corte; y c) micro agrietamiento [2].

Microsurcamiento y micro-corte son las interacciones dominantes en la mayoría de los materiales dúctiles. La proporción de volumen de material desplazado hacia los lados de un surco, es decir, la proporción de microsurcamiento a micro-corte depende del ángulo de ataque de las partículas abrasivas. De acuerdo a ciertos investigadores, el material se desprende de la superficie por micro-corte cuando el ángulo de ataque de las partículas abrasivas es mayor que un valor crítico. En la Fig. 1.7 se presenta el desprendimiento de fragmentos de desgaste de un acero suave por la acción de partículas de acero duro con una carga aplicada de 2 N, obtenida por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) [2].

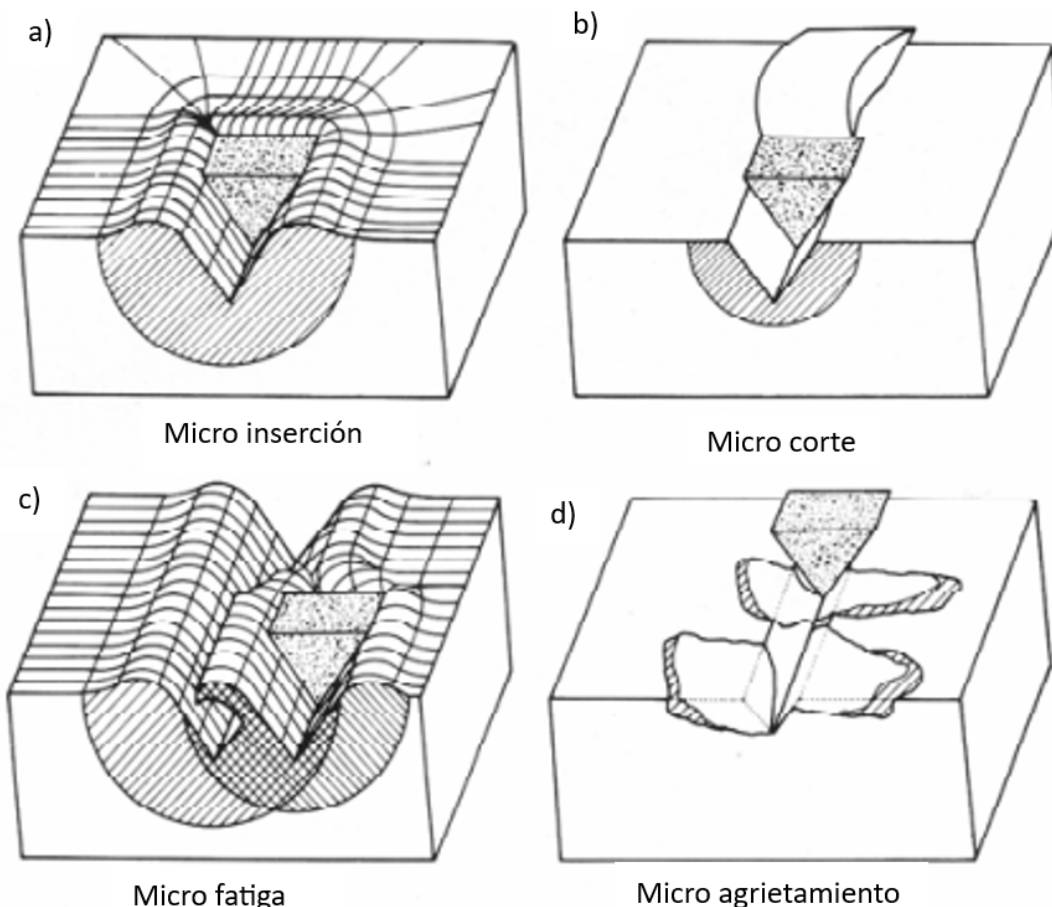


Fig. 1.6. Interacciones físicas entre partículas abrasivas y las superficies de los materiales: a) Micro inserción; b) micro corte; c) micro fatiga; y d) micro agrietamiento [2].

La indentación o surcamiento de materiales frágiles por indentación de partículas abrasivas duras puede causar la formación y propagación de grietas. El micro-agrietamiento causa volúmenes de desgaste mayores que los producidos por la formación de surcos. La transición de microscuramiento a micro-corte depende de las propiedades del material desgastado y de las condiciones operantes, tales como ángulo de ataque y coeficiente de fricción. El desgaste predominantemente por microscuramiento cambia a micro-corte al incrementar la dureza del material desgastado. Un incremento mucho mayor en la dureza del material en desgaste puede producir una transición de micro-corte a micro-agrietamiento. De acuerdo con ciertos investigadores, materiales muy frágiles se pueden deformar plásticamente hasta que la zona de deformación excede un valor crítico que resulta en la formación de grietas. En base a

esto se ha propuesto un tamaño crítico de zona plástica como el criterio más probable para la fractura de vidrio. También, se ha demostrado que el tamaño de la partícula abrasiva puede influenciar críticamente la transición de desgaste predominantemente por micro-corte a predominantemente por micro-agrietamiento. La abrasión de materiales por abrasivos suaves ocurre por fricción. Las partículas pueden ser llamadas suaves cuando su dureza es menor o igual que la dureza del material en desgaste. El ataque de abrasivos suaves puede producir deformación elástica y plástica, fatiga superficial, agrietamiento superficial y adhesión. Debido a la deformación plástica de las protuberancias de las superficies en desgaste, estas pueden ser cortadas o empujadas hacia los lados repetidamente por las partículas suaves en movimiento [2].

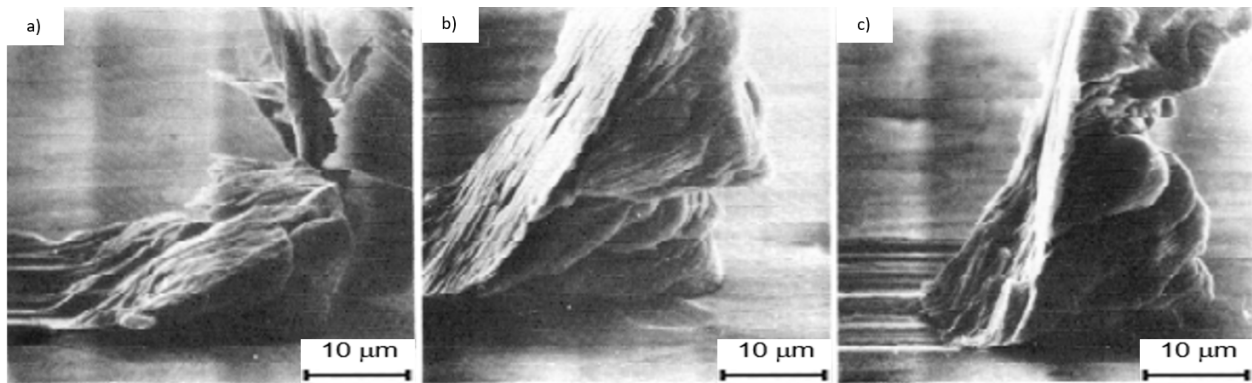


Fig. 1.7. Fotomicrografías del surcamiento de un acero suave por protuberancias de acero duro con diferentes ángulos de ataque: a) 30°; b) 60°; y c) 90° [2].

1.2.3. REACCIÓN TRIBOQUÍMICA

El desgaste triboquímico consiste en la formación de productos de una reacción química como resultado de las interacciones entre los componentes del tribosistema. Puede ser caracterizado por el contacto friccionante entre dos superficies sólidas que reaccionan con el ambiente. Este ambiente corrosivo puede ser gaseoso o líquido. El proceso de desgaste procede por una remoción continua de una capa de reacción y la formación de una nueva sobre las superficies en contacto. En presencia del oxígeno del aire, los fragmentos de desgaste consisten principalmente de óxidos que se han formado sobre la superficie y se han eliminado por la fricción [2]

1.2.4. FATIGA SUPERFICIAL

Es el desgaste causado por fatiga superficial y formación de grietas en regiones superficiales debido a ciclos de esfuerzo que producen separación de partículas de material. Puede ser caracterizado por la formación de grietas y el desprendimiento de “hojuelas” de material causado por una repetición de cargas alternantes de superficies sólidas. El contacto por rodamiento y/o deslizamiento de sólidos y el contacto por impacto de sólidos y/o líquidos pueden producir un estresamiento cíclico en la superficie. La fatiga localizada puede ocurrir a escala microscópica debido a contactos por deslizamiento repetidos de asperezas sobre la superficie de sólidos en movimiento relativo [2].

La formación y propagación de grietas debido a carga repetida en contacto por rodamiento puede producir picaduras. En la Fig. 1.8 se presenta el daño superficial causado por picaduras poco profundas por contacto por rodamiento/deslizamiento [2].

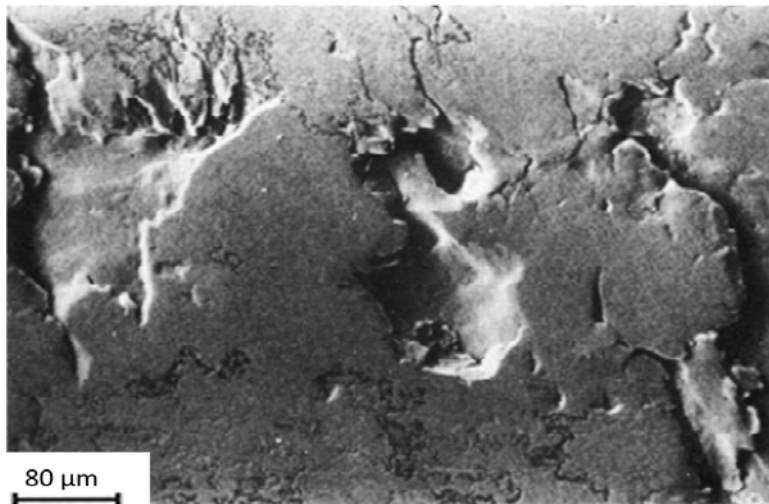


Fig. 1.8. Picaduras sobre la superficie de un acero cementado, endurecido a 60 HRC [2].

Se han propuesto dos modelos para la formación de picaduras en superficies estresadas debido a la fatiga por contacto por rodamiento. Uno es que las grietas son causadas por esfuerzos de compresión y de tracción en el área de contacto; el origen de las grietas en la superficie del sólido es favorecida por inclusiones superficiales, indentaciones del proceso de fabricación, indentaciones debido a la acción de surcamiento de partículas de desgaste o suciedad o en general por cualquier cosa que

incrementemente el esfuerzo en la superficie. Las partículas de desgaste se pueden producir por el alisamiento, aplastamiento y, finalmente, por el agrietamiento de asperezas superficiales en el sólido. Las grietas que se originan en la superficie se propagan en una dirección inclinada desde la superficie hacia dentro del material, tal como se presenta esquemáticamente en la Fig. 1.9 [2].

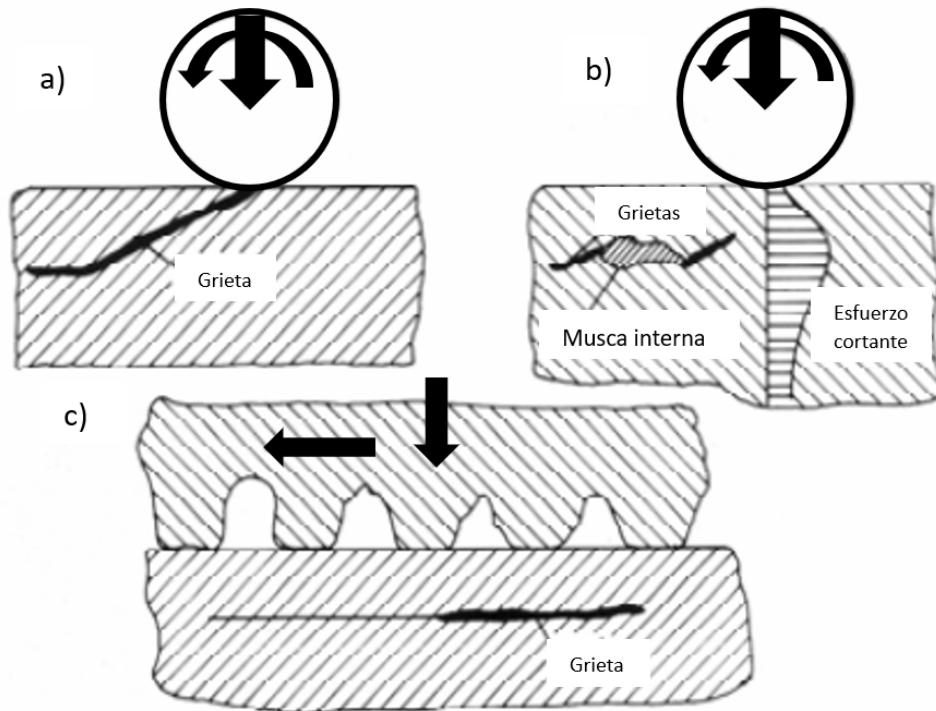


Fig. 1.9. Formación y propagación de grietas por fatiga superficial según condición de esfuerzo: a) Esfuerzo normal y fricción superficial; b) esfuerzos combinados y fricción superficial; y c) fricción superficial con carga normal distribuida [2].

También, la fatiga superficial puede ser importante en el contacto por deslizamiento entre dos sólidos. El deslizamiento repetido de asperezas duras a través de la superficie puede causar la formación y propagación de grietas por debajo de la superficie estresada, en conexión con mecanismos de adhesión o abrasión. Las grietas subsuperficiales se pueden propagar paralelas a la superficie como se presenta esquemáticamente en la Fig. 1.9c, cuando estas grietas se propagan hacia la superficie se desprenden fragmentos de desgaste. En general, esta desintegración superficial por delaminación, es debida a la acción simultánea de adhesión y/o abrasión y fatiga superficial. El cargado cíclico de la superficie estresada es producto de las fuerzas de

fricción y normal en el área de contacto. Las fuerzas de fricción provienen de la adhesión y/o abrasión entre las asperezas y la superficie en desgaste. Este mecanismo de fatiga superficial puede ser particularmente importante en materiales altamente elásticos [2].

El mecanismo de desgaste en la cavitación es fundamentalmente un proceso de erosión mecánica inducida por el colapso violento de burbujas de vapor en un fluido, que genera micro chorros y ondas de choque capaces de impactar y dañar superficies sólidas. Este fenómeno produce fatiga superficial, picaduras y eventual remoción de material, comprometiendo la integridad de los componentes como bombas, turbinas y hélices.

El término cavitación alude a la formación dentro de un fluido de “cavidades” o burbujas las que, al viajar a zonas de mayor presión, colapsan cuando el vapor regresa al estado líquido de manera súbita; ello produce un brusco aplastamiento de las burbujas y el arranque de metal de la superficie en la que origina este fenómeno [3].

1.3. ESTUDIOS DE DESGASTE

El desgaste de materiales es un fenómeno crítico que afecta la durabilidad y el rendimiento de componentes en una amplia gama de aplicaciones industriales. Para entender y mitigar los efectos del desgaste, es esencial conocer los tipos de desgaste para así llevar a cabo ensayos que permitan evaluar cómo se comportan los materiales bajo diversas condiciones de uso [1].

1.4. TIPOS DE DESGASTE

Un metal puede ser sometido a un movimiento relativo ya sea con un cuerpo sólido o no sólido; así como también, puede existir interacción entre metal y líquidos (agua o aceites lubricantes). Los tipos principales de desgaste son: por adhesión, por abrasión, por erosión, por cavitación y por vibración [4].

El desgaste por adhesión ocurre cuando dos superficies se deslizan una sobre la otra o existe una presión que mantiene unidas a dichas superficies. La tendencia de dos

superficies en contacto a adherirse proviene de fuerzas de atracción que existe entre los átomos de la superficie de ambos materiales. Si estas dos superficies en contacto se separan mediante la aplicación de una fuerza normal o tangencial, las fuerzas de atracción entre los átomos generan un esfuerzo que causa el desprendimiento de material de una superficie hacia la otra. Para el caso del desgaste por adherencia el movimiento relativo puede ser deslizamiento unidireccional o de vaivén, o bien la interacción ocurre bajo carga en un contacto oscilatorio de pequeña amplitud [4].

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. Estas partículas pueden proceder del ambiente (arena y/o polvo) o como consecuencia del desgaste por adhesión y/o por un proceso de corrosión [4].

El desgaste por erosión es causado por un fluido a alta presión con partículas sólidas en suspensión las cuales al impactar sobre una superficie arrancan material de ella debido a los efectos de momento de las partículas [4].

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 [5].

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 se transportan 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 [5].

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

debido al desgaste de capas superficiales o por picaduras, como en el caso de los engranes. Las grietas por fatiga aparecen debajo de la superficie en un punto en que el esfuerzo cortante es máximo [4].

1.5. TIPOS DE MÁQUINAS PARA REALIZAR ENSAYOS DE DESGASTE

Con los avances tecnológicos, se han desarrollado múltiples tipos de ensayos de desgaste, cada uno diseñado para simular diferentes escenarios y proporcionar datos sobre la resistencia al desgaste de los materiales. A continuación, se presentan algunas de las características de los diferentes tipos de máquinas empleadas en estas pruebas, así [

a) Espiga sobre mesa oscilante (ver Fig. 1.10).

Esta máquina está diseñada para medir la fricción con cargas ligeras y está constituida por los siguientes componentes: 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 [4].

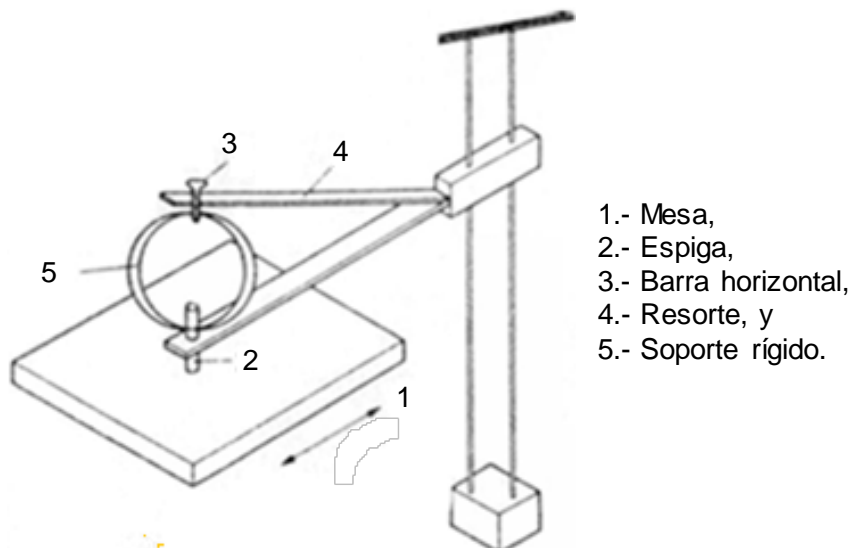


Fig. 1.10. Espiga sobre mesa oscilante [4].

b) Espiga sobre buje (ver Fig. 1.11).

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

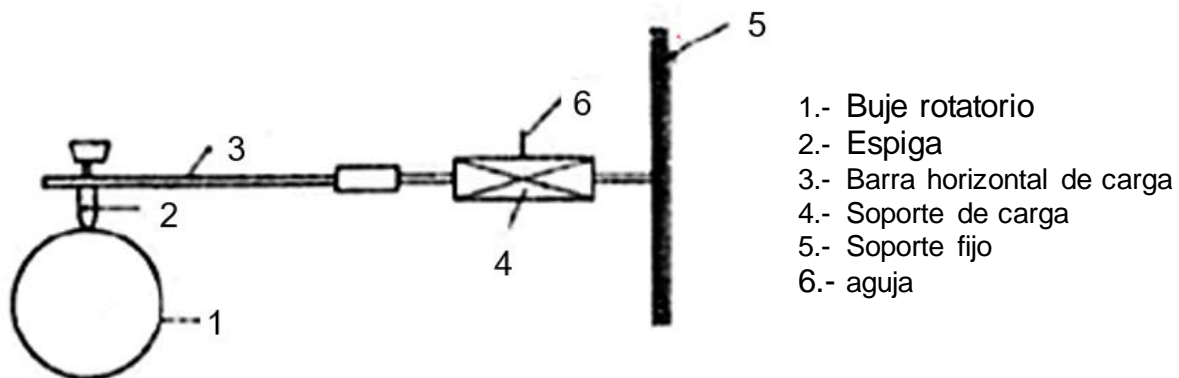


Fig. 1.11. Máquina de espiga sobre buje [4].

c) Cilindros cruzados (ver Fig. 1.12).

En esta máquina una espiga cilíndrica (1) se coloca sobre un cilindro giratorio de mayor diámetro. La espiga se encuentra acoplada a un resorte (2) el cual se deforma debido al arrastre friccional, dicha deformación se censa por un transductor (3) [4].

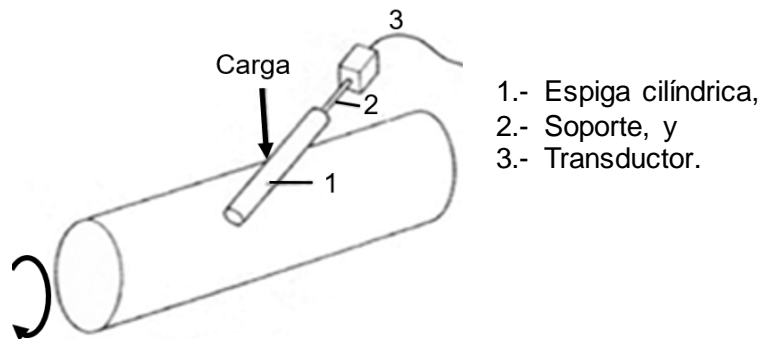
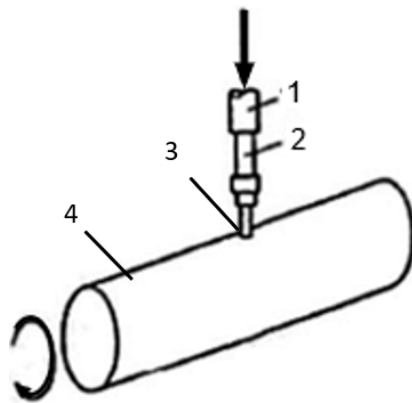


Fig. 1.12. Cilindros cruzados [4].

d) Espiga sobre cilindro (ver Fig. 1.13).

Esta máquina está constituida por una espiga (3) de geometría cilíndrica o hemisférica que esta acoplada sobre un cilindro 4, que gira a determinadas rpm. La deflexión de la espiga debida a la fricción se mide por medio de transductores (1) o calibradores de deformación acoplados a la sección reducida (2) [3].



- 1.- Transductor,
- 2.- Acoplamiento,
- 3.- Espiga, y
- 4.- Cilindro giratorio.

Fig. 1.13. Máquina de espiga sobre cilindro [4].

e) Máquina de cuatro bolas.

El propósito principal de esta máquina es evaluar las propiedades antiadherentes de los aceites, no obstante, 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 está en contacto entre sí y una cuarta bola se fija al extremo de una barra vertical, la cual queda en contacto con las otras tres bolas inferiores. Una palanca que soporta un peso ajustable comprime las tres bolas estacionarias sobre la cuarta y el momento de torsión que se transmite se mide durante la rotación de la barra vertical. El coeficiente de fricción se registra durante la prueba y se miden las huellas causadas por el desgaste sobre las tres bolas [4].

f) Máquina de espiga sobre disco.

Esta máquina es un aparato muy usado para pruebas de des gaste en ella la espiga se coloca perpendicularmente a un disco giratorio. 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 probeta en una balanza [4].

1.6. MÉTODOS DE ENSAYOS DE DESGASTE

- La Norma G 99-04 es la norma American Society for Testing and Materials (ASTM), la cual es un estándar para pruebas de desgaste usando un aparato Pin-On-Disk. Esta norma se utiliza para evaluar la resistencia al desgaste de materiales mediante una prueba específica donde una espiga se desliza sobre un disco o material de estudio [9].
- Espiga sobre disco

La prueba de desgaste de espiga sobre disco es un método para caracterizar el coeficiente de fricción, la fuerza de fricción y la tasa de desgaste entre dos materiales. Durante esta prueba tribológica, un disco estacionario se articula contra una espiga giratorio mientras se aplica una carga constante. Tal como se presenta en la Fig. 1.14 una prueba de espiga sobre disco consiste en una "espiga" estacionario bajo una carga aplicada en contacto con un disco giratorio [4].

La espiga puede tener cualquier forma para simular un contacto específico, no obstante, a menudo se utilizan puntas esféricas para simplificar la geometría del contacto. La espiga se presiona contra el disco en una carga específica generalmente por medio de un brazo o palanca y pesas adjuntas. Los resultados del desgaste se expresan 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 en la posición de la espiga como en la del disco [5].

La cantidad de desgaste se determina midiendo las dimensiones lineales apropiadas de las espigas y los discos antes y después del ensayo, o pesándolos antes y después del ensayo. El coeficiente de fricción está determinado por la relación entre la fuerza de fricción y la fuerza de carga sobre la espiga [5].

Las pruebas de desgaste de espiga sobre disco pueden simular múltiples modos de desgaste, incluidos: unidireccional, bidireccional, omnidireccional y cuasi rotacional [5].

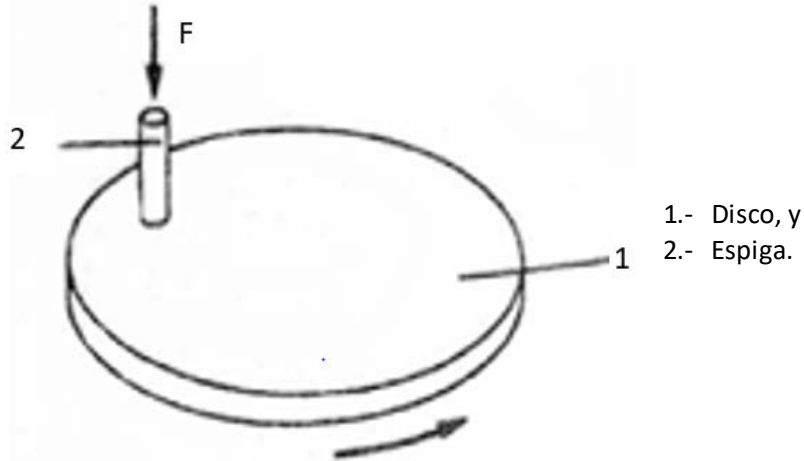


Fig. 1.14. Máquina de espiga sobre disco [4].

- Desgaste abrasivo de espiga sobre tambor

En esta prueba, un extremo de una muestra de la espiga cilíndrica se mueve sobre papel abrasivo con carga suficiente para desgastar el material de la muestra y triturar los granos abrasivos fijos. Esta prueba simula el desgaste que ocurre durante la trituración y molienda del mineral en el que se tritura el abrasivo (el mineral). La espiga también gira mientras se desplaza, tal como se presenta en la Fig. 1.16, lo cual garantiza que la espiga siempre entre en contacto con abrasivo nuevo. Esta es una prueba de abrasión de alto estrés, ya que la carga es suficiente para fracturar las partículas abrasivas [4].

- Ensayo taber

El Taber Abraser, ASTM 1044, se utiliza para medir la resistencia al desgaste abrasivo. El desgaste abrasivo de esfuerzo bajo ocurre cuando las partículas duras son forzadas contra una superficie plana y sólida y se mueven a lo largo de ella, donde la carga de partículas es insuficiente para causar la fractura de las partículas duras. Con este método se puede evaluar el desgaste abrasivo de dos y tres cuerpos. El aparato Taber se presenta en la Fig. 1.15 la muestra, que está recubierta o no, se gira, lo que hace que las ruedas abrasivas arrastren y desgasten la superficie. El desgaste normalmente está determinado por la pérdida de peso [4].

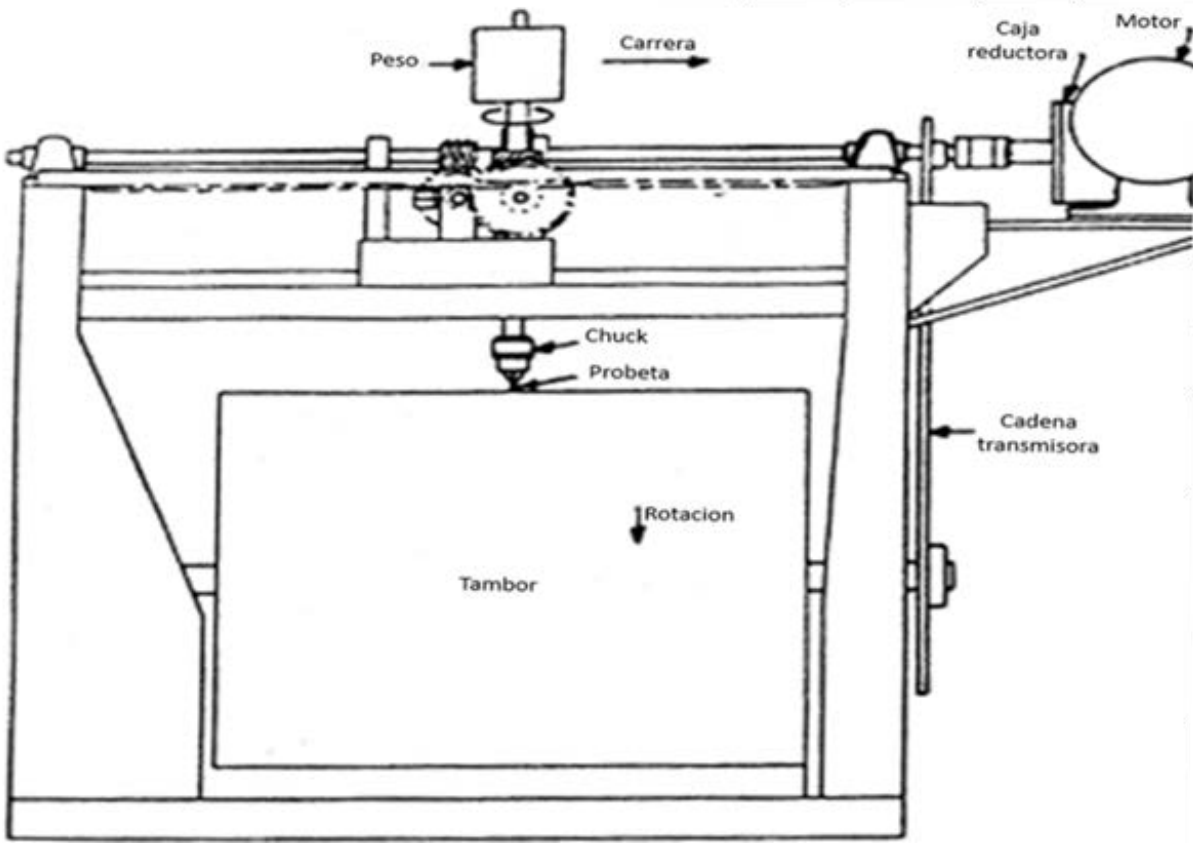


Fig. 1.15. Aparato de espiga sobre disco [5].

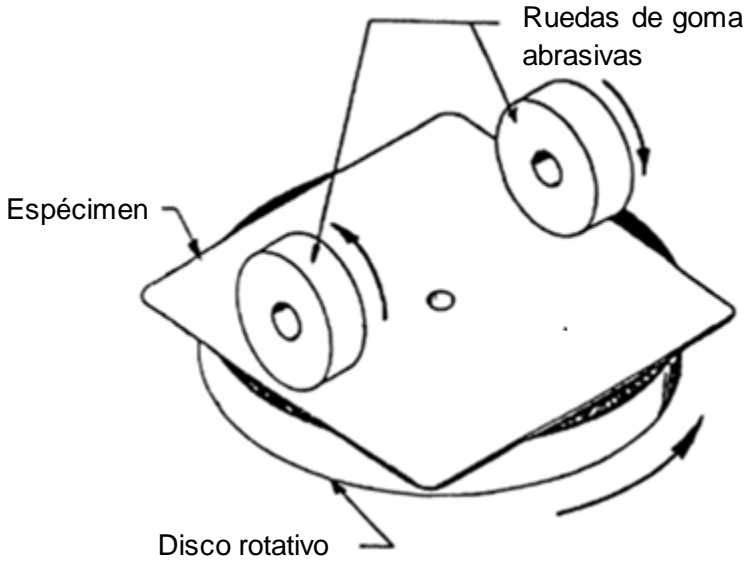


Fig. 1.16. Aparato Taber [5].

1.7. MÉTODOS PARA DETERMINAR EL DESGASTE

La manera más común de determinar el desgaste consiste en examinar los materiales antes y después del deslizamiento, cualquier diferencia en los materiales se le atribuye al desgaste. Entre los métodos más utilizados en la determinación del desgaste se tienen los siguientes [6]:

- a) El método del peso consiste en pesar el componente a ser examinado, para ello dicho componente se debe limpiar cuidadosamente (generalmente se usan solventes como tricloroetileno o acetona), y luego se pesa.
- b) El método de medición mecánica utiliza un micrómetro que tiene una precisión de $\sim 10^{-3}$ cm, el cual se utiliza para realizar las mediciones necesarias para el cálculo del área dejada por la espiga. Este método es usado cuando se estudia el desgaste en componentes de gran tamaño, tales como los cilindros de un motor de automóvil.
- c) El método óptico consiste en hacer una pequeña indentación con un micro durómetro en la superficie a estudiar, y luego observar la reducción del tamaño de la indentación durante el deslizamiento.
- d) Las técnicas de Radio trazadores son tan versátiles que es posible llevar a cabo varios experimentos. Con estas técnicas se puede estudiar la dinámica del proceso de desgaste por deslizamiento; así, si se desliza un espécimen radiactivo en una superficie no radioactiva de mayor dureza, éste formará una capa de residuos de desgaste radiactivos sobre la superficie, luego se reemplaza el espécimen radiactivo por uno no radiactivo y se reinicia el deslizamiento, al observar los residuos radiactivos con un Radio trazador, éstos son reemplazados rápidamente de la superficie no radioactiva.

1.8. TRATAMIENTOS TÉRMICOS COMO MECANISMO DE CONTROL DE DESGASTE

Los tratamientos térmicos tienen como propósito el mejorar las propiedades y características de los aceros, y consisten en calentar y mantener las piezas o herramientas de acero a una temperatura adecuada, durante un cierto tiempo y luego realizar un enfriamiento en un medio conveniente. El tiempo y la temperatura de

mantenimiento, son los factores principales y previamente siempre se tiene que fijar, de acuerdo con [6]:

- La composición del acero,
- La forma y el tamaño de la pieza o herramienta, y
- Las características que se desean obtener.

La definición de tratamiento térmico dada en el Metals Handbook es: "Una combinación de operaciones de calentamiento y enfriamiento, de tiempos determinados y aplicadas a un metal o aleación en el estado sólido en una forma tal que producirá propiedades deseadas." Todos los procesos básicos de tratamientos térmicos para aceros incluyen la transformación o descomposición de la austenita. La naturaleza y la apariencia de estos productos de transformación determinan las propiedades físicas y mecánicas de cualquier acero [6].

- El primer paso en el tratamiento térmico del acero es calentar el material a una temperatura definida, en o por encima del intervalo crítico para formar austenita [6].
- Los materiales altamente esforzados producidos por trabajado en frío se deben calentar más lentamente que los que se hallan libres de esfuerzos para evitar distorsión [6].
- Se puede considerar la diferencia en temperatura que tiene lugar dentro de las secciones gruesas y delgadas de artículos de sección transversal variable y, siempre que sea posible, se debe tomar alguna medida para hacer más lento el calentamiento de las secciones más delgadas, de tal modo que sea posible minimizar el esfuerzo térmico y la distorsión. Por lo general se hará menos daño al acero al utilizar una rapidez de calentamiento tan lenta como sea práctico [6].

1.8.1. RECOCIDO TOTAL

Este proceso consiste en calentar el acero a la temperatura adecuada y luego enfriar lentamente a lo largo del intervalo de transformación, preferentemente en el horno o en cualquier material que sea buen aislante al calor [6].

El propósito del recocido es refinar el grano para mejorar las propiedades mecánicas del material, en este caso para disminuir los esfuerzos residuales. Como la masa total del horno se debe enfriar junto con el material, el recocido es un proceso de enfriamiento muy lento y, por tanto, llega a estar muy próximo al siguiente diagrama de equilibrio hierro-carburo de hierro presentado (ver Fig. 1.17) [6].

Supóngase que se tiene un acero de grano grueso al 0.20% de C (hipo eutectoide) y que se desea refinar el tamaño de grano por recocido. En la Fig. 1.18a se presenta la microestructura. Cuando este acero se calienta, no ocurrirá cambio alguno hasta que la línea A_1 (crítica inferior) se cruza. A esa temperatura, las áreas de perlita se transformarán en pequeños granos de austenita por medio de la reacción eutectoide, no obstante, los grandes granos de ferrita originales permanecerán invariables Fig. 1.18b. El enfriamiento desde esta temperatura no refinará el grano. Si se continúa el calentamiento entre las líneas A_1 y A_3 , será posible que los grandes granos de ferrita se transformen en pequeños granos de austenita, de manera que por encima de la línea A_3 (crítica superior) toda la microestructura mostrará sólo pequeños granos de austenita ver Fig. 1.18c. El enfriamiento subsecuente del horno dará lugar a pequeños granos de ferrita proeutectoide y pequeñas áreas de gruesa perlita laminar ver Fig. 1.18d. Por lo tanto, la temperatura de recocido adecuada para aceros hipo eutectoides es de ~ 50 °F por encima de la línea A_3 [6].

El refinamiento del tamaño de grano de acero hipereutectoide tendrá lugar a unos 50 °F por encima de la línea de temperatura crítica inferior. El calentamiento por encima de esta temperatura hará más gruesos los granos austeníticos; los cuales, al enfriarse, se transformarán en grandes áreas perlíticas. La microestructura del acero recocido hipereutectoide consistirá en gruesas áreas de perlita laminar, rodeadas por una red de cementita proeutectoide. Debido a que este exceso de red de cementita es frágil y tiende a ser un plano de fragilidad, el recocido nunca debe constituir un tratamiento térmico final para los aceros hipereutectoides. La presencia de una frontera de grano gruesa y dura también producirá una maquinabilidad deficiente [6].

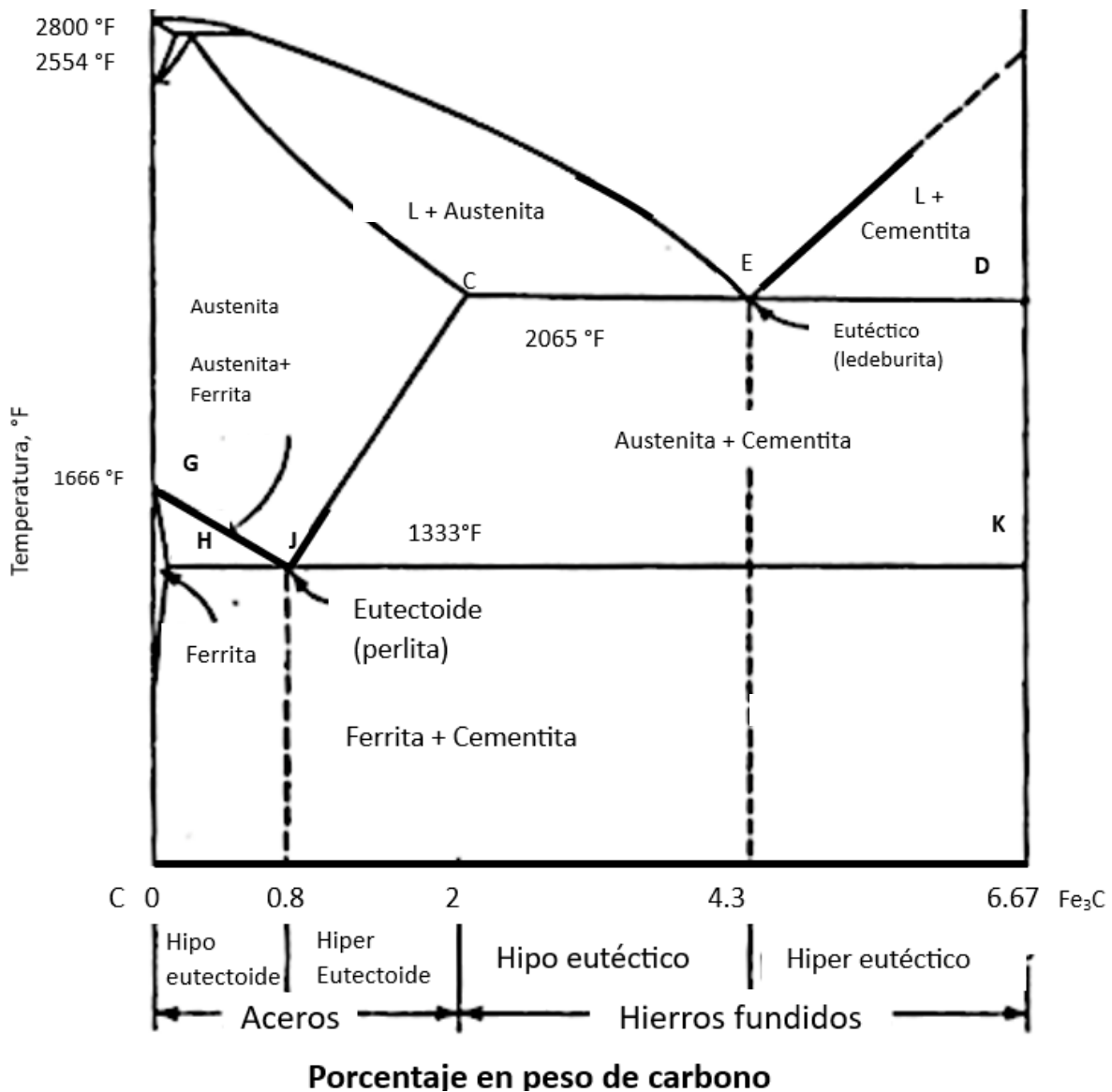


Fig. 1.17 Diagrama de equilibrio hierro-carburo de hierro marcado con los nombres comunes para las estructuras [6].

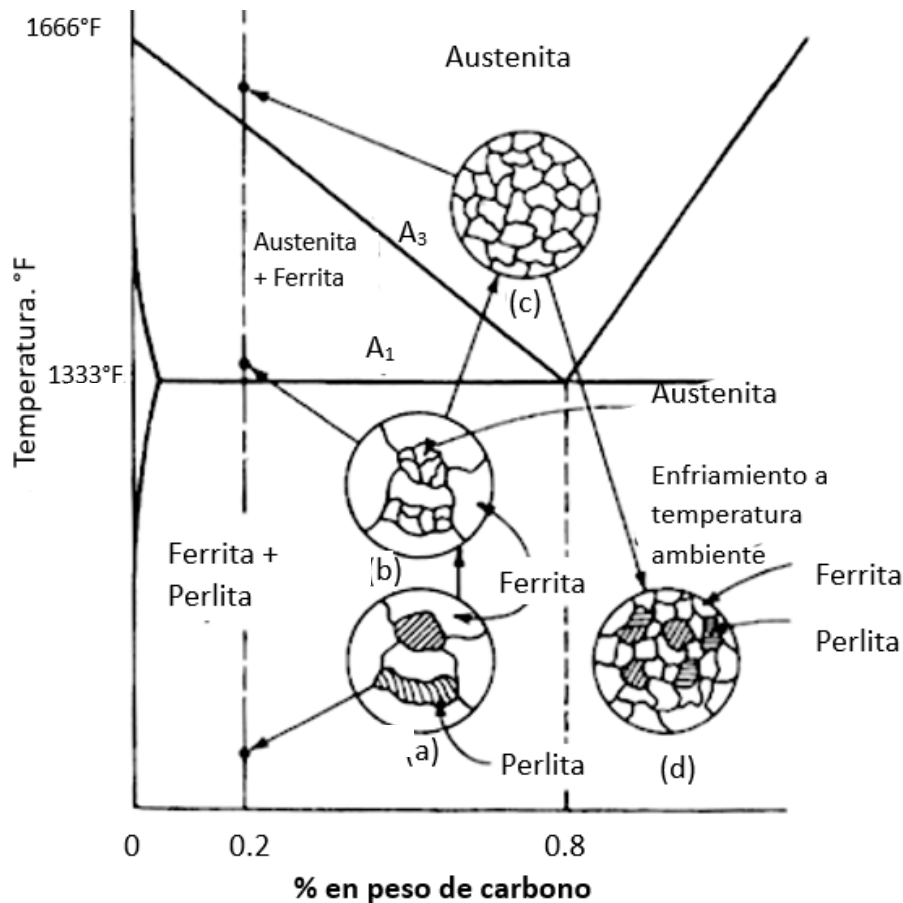


Fig. 1.18. Esquemas de los cambios en microestructura durante el recocido de un acero al 0.20% de C: a) Estructura original, ferrita y perlita de grano grueso; y b) justo por encima de la línea A₁; la perlita se ha transformado en pequeños granos de austenita y la ferrita no ha cambiado c) por encima de la línea A₃; solo la austenita de grano fino d) después de enfriar a temperatura ambiente; ferrita de grano fino y pequeñas áreas perlíticas [6].

Un cuidadoso estudio microscópico de las proporciones de ferrita y perlita o de perlita y cementita, presentes en un acero recocido, permitirá determinar el contenido de carbono aproximado del acero (ver Fig. 1.19) [6].

- ✓ La resistencia a la tracción aproximada de los aceros recocidos hipos eutectoides se puede determinar por la proporción de ferrita y perlita presentes: Resistencia pensil aproximada = $(40,000 * \% \text{ de } \alpha + 120,000 * \% \text{ de Perlita}) / 100\%$ [6].
- ✓ Por ejemplo: el acero recocido al 0.20% de C contiene ~25% de perlita y 75% de ferrita. Si se aplica la fórmula anterior: Resistencia a la tracción aproximada es igual a $(40,000 * 0.75 + 120,000 * 0.25)$ dando como resultado 60,000 lb/pulg [6].

Esta misma idea no se puede aplicar a los aceros hipereutectoides, ya que su resistencia está determinada por la red de cementita que forma la fase continua. La presencia de la red frágil resulta en una caída en resistencia a la tracción superior al 0.8% de C. En la Fig. 1.19 se presenta el intervalo de recocido adecuado para los aceros hipo eutectoides e hipereutectoides.

1.8.2. RECOCIDO PARA ELIMINACIÓN DE ESFUERZOS

Este proceso, algunas veces llamado recocido subcrítico, es útil para eliminar esfuerzos residuales debidos a un fuerte maquinado u otros procesos de trabajo en frío. Generalmente se lleva a cabo a temperaturas por debajo de la línea crítica inferior (1,000 a 1,200 °F) [6].

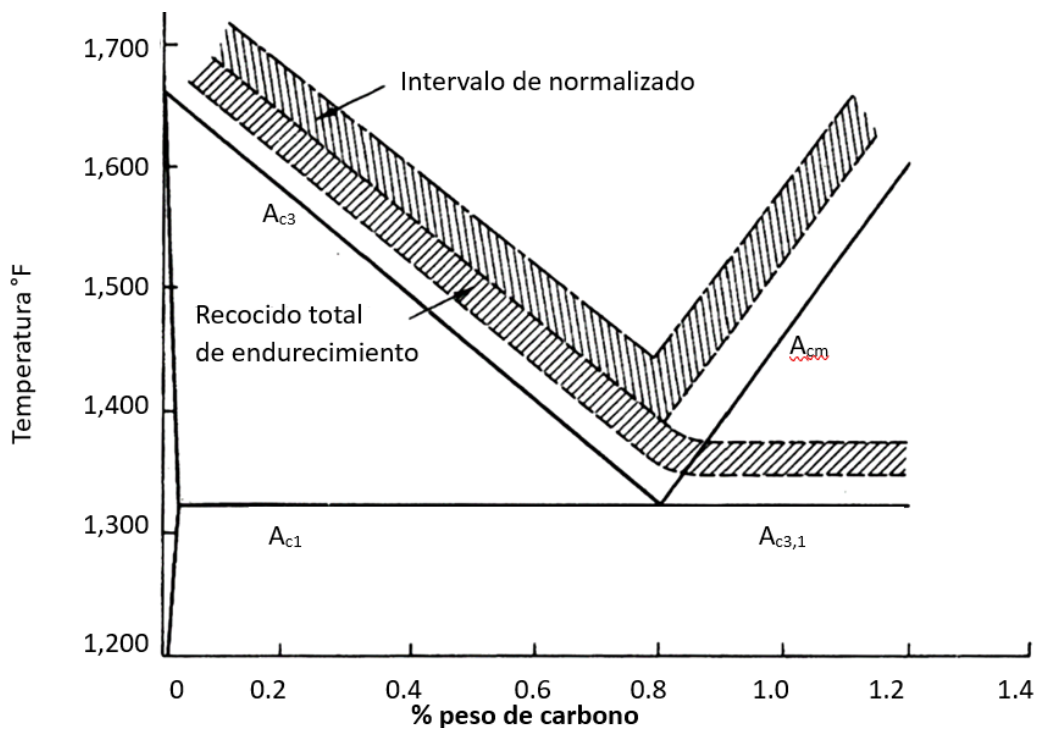


Fig. 1.19. Intervalo de recocido, normalizado y temple para aceros al carbono [6].

1.8.3. RECOCIDO DE PROCESO

Este tratamiento térmico se utiliza en las industrias de la lámina y alambre y se lleva a cabo al calentar el acero a una temperatura por debajo de la línea crítica inferior (1,000 a 1,250 °F). Se aplica después del trabajado en frío y suaviza el acero, mediante recristalización, para un trabajado ulterior; es muy parecido al recocido para eliminación de esfuerzos [6].

1.8.4. NORMALIZACIÓN

El normalizado del acero se lleva a cabo al calentar ~100 °F por encima de la línea de temperatura crítica superior (A_{c3} o A_{cm}) seguida por un enfriamiento en aire quieto hasta la temperatura ambiente. En la Fig. 1.18 se presenta el intervalo de temperatura para normalización. El propósito del normalizado es producir un acero más duro y más fuerte que el obtenido por recocido total, de manera que para algunas aplicaciones el normalizado pueda ser un tratamiento térmico final. Por lo tanto, para aceros hipereutectoides, es necesario calentar por encima de la línea A_{cm} a fin de disolver la red de cementita. También, el normalizado se puede utilizar para mejorar la maquinabilidad, modificar y refinar las estructuras dendríticas de piezas de fundición, y refinar el grano y homogeneizar la microestructura para mejorar la respuesta en las operaciones de endurecimiento. El incremento en la rapidez de enfriamiento por aire cuando se compara con el enfriamiento por horno afecta en varias formas la transformación de la austenita y de la microestructura resultante. Como ya no se enfría en condiciones de equilibrio, el diagrama hierro-carburo de hierro no se puede utilizar para predecir las proporciones de ferrita y perlita proeutectoide o cementita y perlita proeutectoide que existirán a temperatura ambiente. Así, se tiene menos tiempo para la formación de la constituyente proeutectoide; en consecuencia, habrá menos ferrita proeutectoide en los aceros normalizados hipo eutectoides y menos cementita proeutectoide en los aceros hipereutectoides en comparación con los aceros recocidos. En la Fig. 1.20 se presentan la microestructura de un acero normalizado al 0.50 % de C. En la condición de recocido, este acero tendría ~62% de perlita y 38% de ferrita proeutectoide. Debido al enfriamiento

por aire, esta muestra tiene sólo como el 10% de ferrita proeutectoide, que es la red blanca que rodea las áreas oscuras de perlita. Para los aceros hipereutectoides, el normalizado reducirá la continuidad de la red de cementita proeutectoide, y en algunos casos se puede eliminar por completo. Como la presencia de la red de cementita redujo la resistencia de los aceros recocidos hipereutectoides, los aceros normalizados deben mostrar un aumento en resistencia [6].

Aparte de influir la cantidad de constituyente proeutectoide que formará, la mayor rapidez de enfriamiento en el normalizado también se afectará la temperatura de la transformación de austenita y la fineza de la perlita. En general, mientras más rápido sea el enfriamiento menor será la temperatura de transformación de la austenita y más fina será la perlita. En la Fig. 1.21 se presenta esquemáticamente la diferencia en espaciamiento de las placas de cementita en la perlita entre recocido normalización [7].

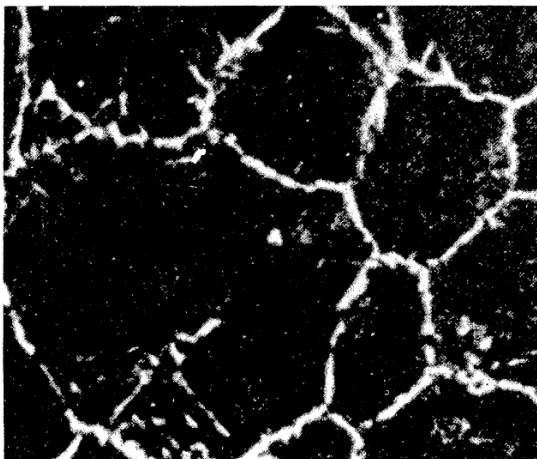


Fig. 1.20. Acero normalizado al 0.50% de C, calentado a 1,800 °F y enfriado en aire; 100x. Las áreas perlíticas están rodeadas por ferrita proeutectoide [7].

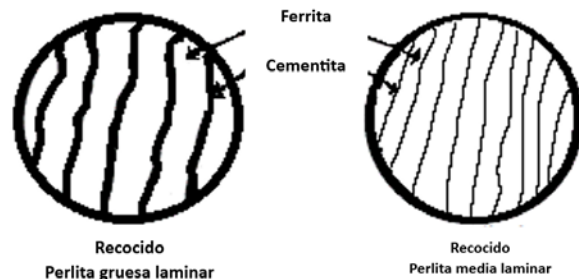


Fig. 1.21. Esquema que se presenta la diferencia en estructura perlita, debido al recocido y al normalizado [7].

La ferrita es muy suave en tanto que el cementita es muy duro, En el caso de perlita normalizada media, las placas de cementita más próximas entre sí tienden a endurecer la ferrita de modo que no cederá tan fácilmente, aumentando así la dureza. Si la perlita recocida gruesa tiene una dureza Rockwell C 10 aproximada, entonces la perlita normalizada media será Rockwell C 20 aproximadamente. El enfriamiento fuera del equilibrio también cambia el punto eutectoide hacia un contenido de carbono más bajo

en los aceros hipo eutectoides y hacia un contenido de carbono más alto en aceros hipereutectoides. El efecto neto es que el normalizado produce una estructura de perlita más fina y más abundante que la obtenida por recocido, lo cual resulta en un acero más duro y más fuerte [7].

Aunque tanto el recocido, la esferoidización y el normalizado se pueden emplear para mejorar la maquinabilidad, el proceso que se utilice dependerá del contenido de carbono. Con base en muchos estudios, las microestructuras óptimas de los aceros para maquinado con diferentes contenidos de carbono suelen ser como los presentados en la Tabla 1.1 [7].

Tabla 1.1. Microestructuras óptimas de los aceros para maquinado con diferentes contenidos de carbono [7].

Contenido de C, %	Microestructura optima
0.06 a 0.20	Como laminado en frío
0.20 a 0.30	Inferior a 3 pulg de diámetro, normalizado; superior a 3 pulg de diámetro como laminado en frío
0.30 a 0.40	Recocido, para dar perlita gruesa
0.40 a 1.00	Recocido, para dar perlita gruesa o esferoidita gruesa 100% de esferoidita, de gruesa a fina

1.8.5. TEMPLE

En condición de velocidades de enfriamiento lentas o moderadas, los átomos de carbono se pueden difundir hacia afuera de la estructura de austenita. De este modo, los átomos de hierro se difunden para llegar a formar la estructura cristalina BCC. Esta transformación gamma a alfa tiene lugar mediante un proceso de nucleación y crecimiento y depende del tiempo. Con un aumento adicional en la rapidez de enfriamiento, no se tiene tiempo suficiente para que el carbono se difunda de la solución y, aunque tiene lugar algún movimiento de los átomos de hierro, la estructura no puede llegar a ser BCC, ya que el carbono está atrapado en la solución. La estructura resultante, llamada martensita, es una solución sólida sobresaturada de carbono retenido en una estructura tetragonal centrada en el cuerpo. Dos dimensiones de la celda unitaria son iguales, no obstante, la tercera está ligeramente extendida debido al carbono atrapado.

La razón axial c/a aumenta con el contenido de carbono a un máximo de 1.08, ver Fig. 1.22 [6].

Esta estructura reticular altamente distorsionada es la principal razón para la alta dureza de la martensita. Como los átomos de la martensita están menos densamente empaquetados que en la austenita durante la transformación, ocurre una expansión; sin embargo, durante la formación de martensita, dicha expansión produce altos esfuerzos localizados que dan como resultado la deformación plástica de la matriz. Después de un enfriamiento drástico (temple), la martensita aparece microscópicamente como una estructura blanca acicular o tipo aguja, descrita algunas veces como un haz de pajitas. En la mayoría de los aceros, la estructura martensítica aparece vaga e indeterminable (ver Fig. 1.23). En las aleaciones al alto carbono, en las que el fondo es austenita retenida, la estructura acicular de la martensita está definida más claramente (ver Fig. 1.24) [6].

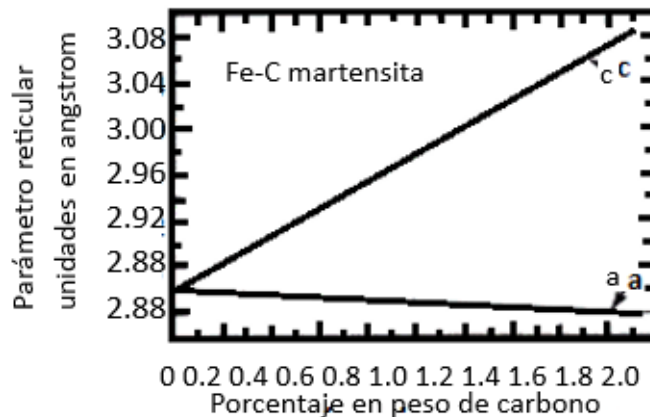


Fig. 1.22. Variación de las constantes reticulares a/c de la martensita con el contenido del carbono en los aceros al carbono [6].

El a la Fig. 1.25 se presenta la influencia del carbono en las temperaturas M_s y M_f . La línea de temperatura M_f se presenta discontinua, ya que por lo general no está claramente definida. En teoría, la transformación de austenita a martensita nunca es completa, y pequeñas cantidades de austenita retenida se conservarán aun a bajas temperatura. La transformación de las últimas trazas de austenita se hace cada vez más

difícil conforme disminuye la cantidad de este. Esto es obvio si se observa la pendiente de la curva al 100% de martensita, tal como se presenta en la Fig. 1.26.

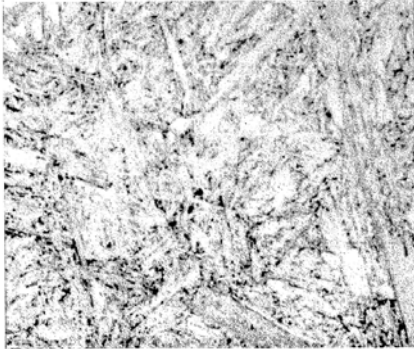


Fig. 1.23. Estructura llamada martensita, 2,500x [6].

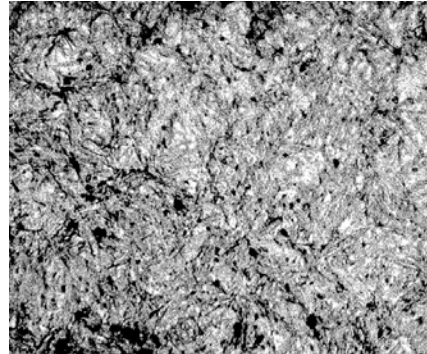


Fig. 1.24. Acero al carbono al 1% templado al agua, atacado químicamente con nital al 2%, 750x Nódulos de martensita están retenidos en la matriz de austenita [6].

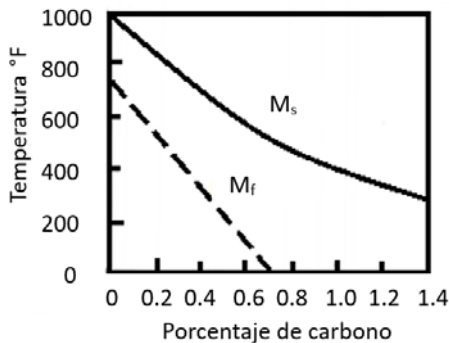


Fig. 1.25. Acero al carbono al 1% templado al agua, atacado químicamente con nital al 2%, 750x Nódulos de martensita están retenidos en la matriz de austenita [6].

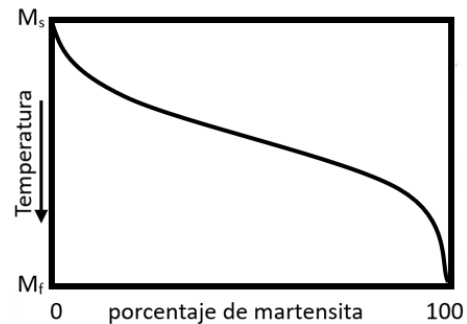


Fig. 1.26. Esquema del porcentaje de martensita formada como función de la temperatura [6].

1.8.6. TRATAMIENTO TÉRMICO SUPERFICIAL

La gran parte de las piezas mecánicas que componen todo tipo de máquinas se fabrican con el fin de que el ciclo de vida útil y propiedades mecánicas sean uniformes en toda su estructura. Sin embargo, en ciertos mecanismos específicos (como por ejemplo engranajes) se necesitan piezas que posean superficies muy duras o con alta resistencia al desgaste. Los tratamientos térmicos y termoquímicos permiten cumplir con

el aumento de las propiedades mecánicas del material y así evitar fallos prematuros en piezas donde las cargas son críticas (ver Fig. 1.27 y Fig. 1.28) [6].

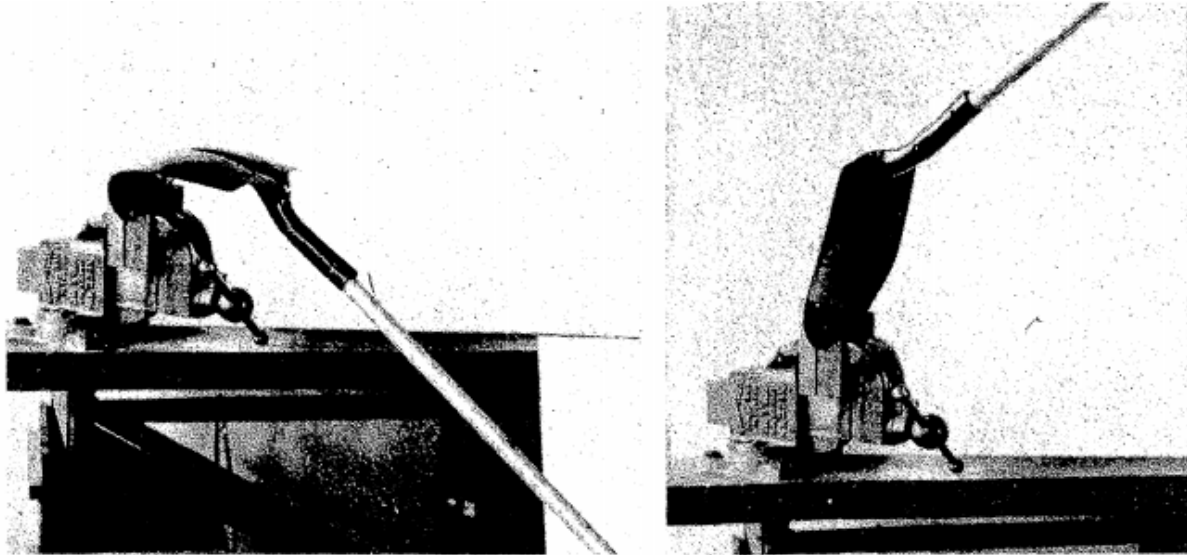


Fig. 1.27. Demostración impresionante de una pala austenizada. El cuadro de la izquierda presenta la extensión a la cual la pala puede ser combada sin que se produzca ninguna falla, y el cuadro de la derecha presenta cómo la pala combada, después de eliminar la fuerza de deformación elástica, regresa a su posición original sin deformación aparente [6].

Estas aplicaciones industriales requieren una superficie dura resistente al desgaste, llamada capa o región superficial, y una relativamente suave y tenaz en su interior, llamada parte interna. Existen cinco métodos principales de tratamiento térmico superficial [6]:

1. Cementación,
2. Nitruración,
3. Cianuración o carbonitruración,
4. Temple por flama, y
5. Temple por inducción.

Los tres primeros métodos cambian la composición química: la cementación por la adición de carbono, la nitruración por la adición de nitrógeno y la cianuración por la adición de carbono y de nitrógeno. Los dos últimos no cambian la composición química del acero y son esencialmente métodos de temple poco profundo. En los métodos de temple por flama y por inducción, el acero debe ser capaz de endurecer; por lo tanto, el contenido de carbono debe ser $\geq 0.30\%$ [6].

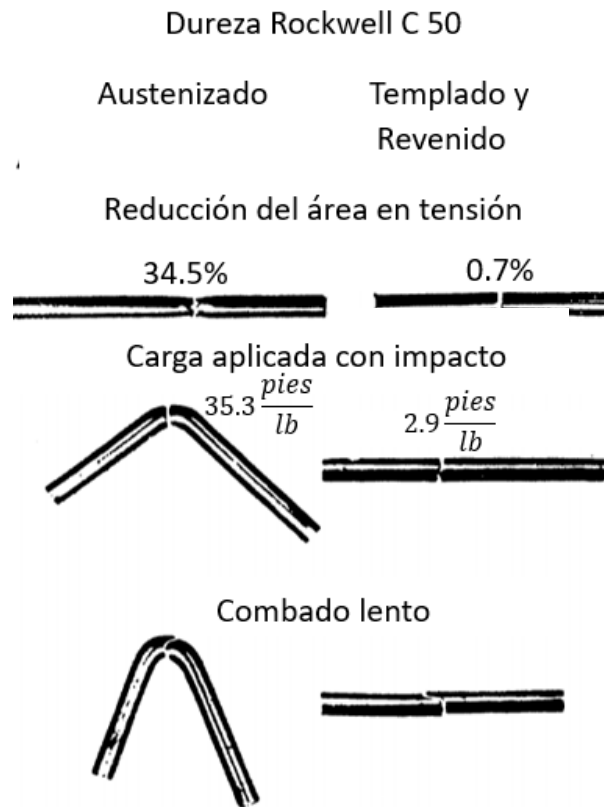


Fig. 1.28. Tenacidad y ductilidad mejoradas de varillas austenizadas que se comparan con varillas templadas y revenidas de igual dureza [6].

1.8.7. CEMENTACIÓN

Es uno de los más viejos y más baratos métodos de endurecimiento superficial un acero de bajo carbono, generalmente como del 0.20% de carbono o menos, se coloca en una atmósfera que contiene grandes cantidades de monóxido de carbono. La temperatura de cementación usual es de 1,700 °F. A esta temperatura, tiene lugar la siguiente reacción: $\text{Fe} + 2\text{CO} \rightarrow \text{Fe}(\text{e}) + \text{CO}_2$; donde Fe, representa el carbono disuelto en austenita [6].

La máxima cantidad de carbono que se puede disolver en austenita a 1,700 °F está señalada en el diagrama de equilibrio hierro-carburo de hierro en la línea Am. Por lo tanto, rápidamente se forma una capa superficial de alto carbono (como del 1.2% de C). 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 ver Fig. 1.30 [6].

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. Después de que la difusión ha tenido lugar por la cantidad de tiempo requerida, dependiente de la profundidad deseada para la parte externa, 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 será 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. Esto se presenta en la Tabla 1.2 [6].

La profundidad de la superficie dura se puede medir microscópicamente con un ocular con escala micrométrica. El gradiente de carbono y la profundidad de la superficie dura, se pueden determinar experimentalmente colocando la pieza en un torno y maquinándola para análisis químico, con incrementos de 0.005 pulg hasta que se alcanza la parte interna ver Fig. 1.29 Se hace el análisis para determinar el contenido de carbono y los resultados se pueden graficar tal como se presenta en las Figs. 1.29 y 1.30, se presentan la relación de tiempo y temperatura con la profundidad de la parte externa [6].

La ecuación de cementación dada anteriormente, $\text{Fe} + 2\text{CO} \rightarrow \text{FeC} + \text{CO}_2$, es reversible y puede proceder a la izquierda, eliminando carbono de la capa superficial si el acero se calienta en una atmósfera que contiene dióxido de carbono (CO). Esto se llama descarburización. Otras posibles reacciones de descarburización son [6]:

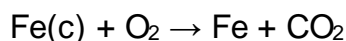
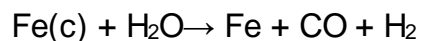


Tabla 1.2. Profundidad de la porción externa en pulgadas al cementar [6].

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	0.030	0.035	0.041
3	0.021	0.025	0.031	0.037	0.043	0.051
4	0.024	0.029	0.035	0.042	0.050	0.059
5	0.027	0.033	0.040	0.047	0.056	0.066
6	0.030	0.036	0.043	0.052	0.061	0.072
7	0.032	0.039	0.047	0.056	0.066	0.078
8	0.034	0.041	0.050	0.060	0.071	0.083
9	0.036	0.044	0.053	0.063	0.075	0.088
10	0.038	0.046	0.056	0.067	0.079	0.093
11	0.040	0.048	0.059	0.070	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	0.090	0.106
14	0.045	0.055	0.066	0.079	0.094	0.110
15	0.047	0.057	0.068	0.082	0.097	0.114
16	0.048	0.059	0.071	0.084	0.100	0.117

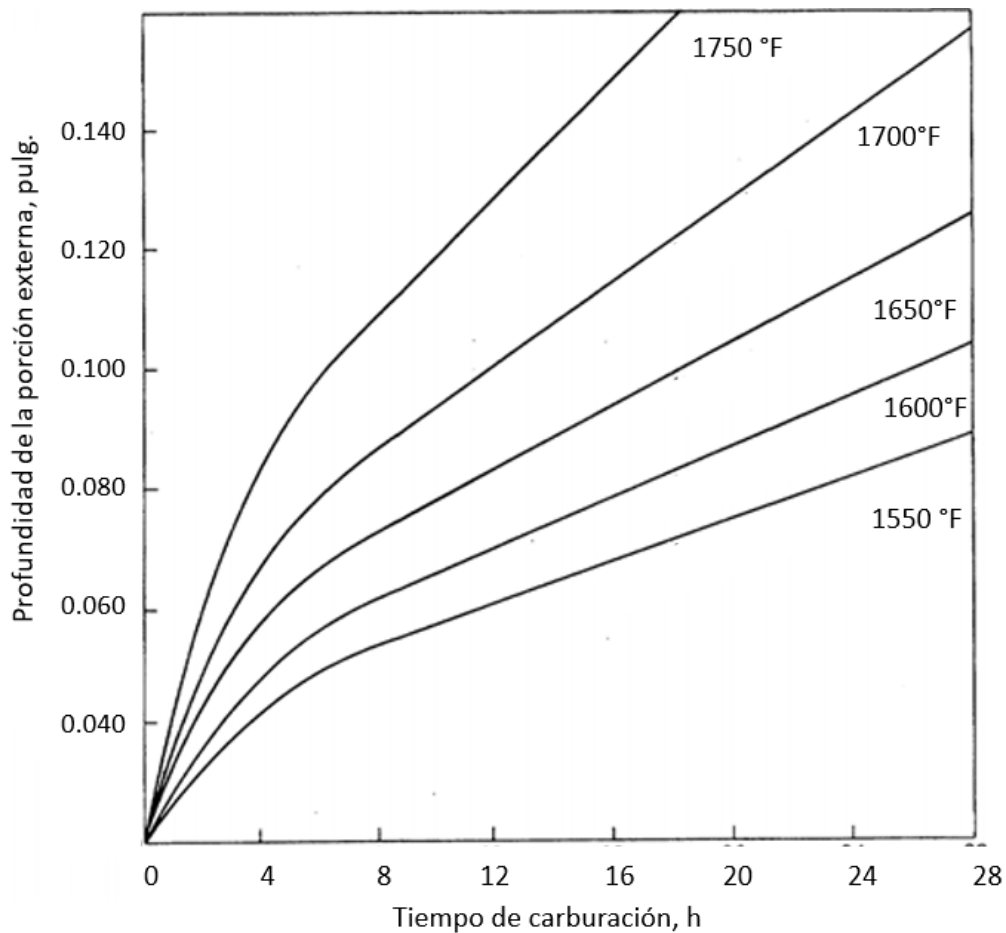


Fig. 1.29. Profundidad de la porción externa cementada en relación del tiempo y la temperatura de carburación [6].

[6].

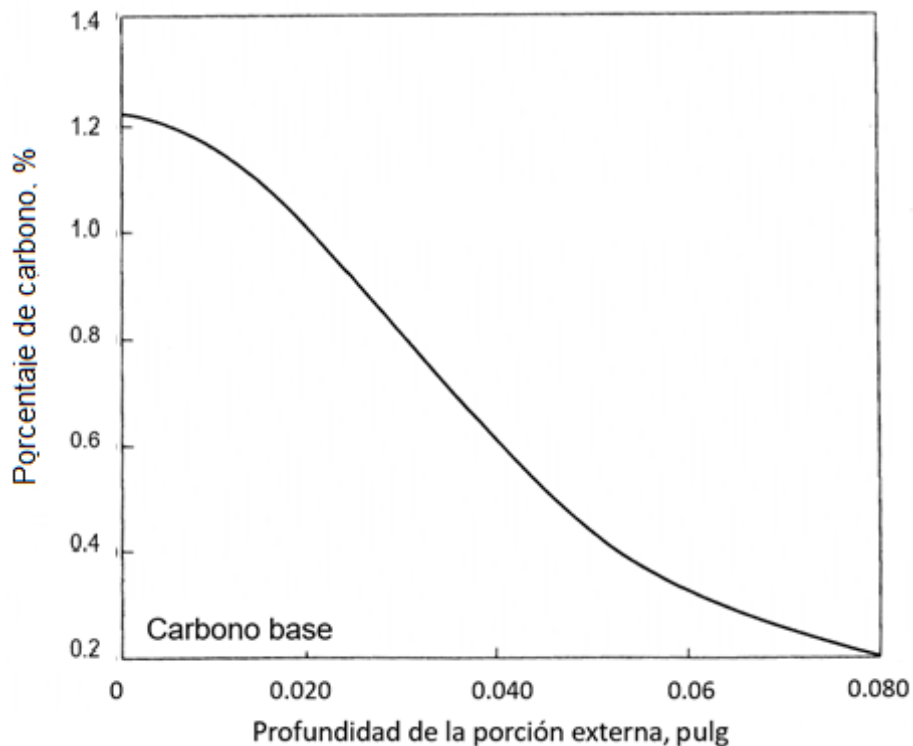


Fig. 1.30. Gradiente de concentración de carbono en un acero cementado con 0.080 pulg de porción externa total [6].

La descarburización es un problema principalmente con los aceros al 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. 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. 1.31 se presenta una descarburización en la superficie de un acero de alto carbono [6].

La descarburización se puede prevenir mediante una atmósfera endotérmica de gas en el horno, a fin de proteger la superficie del acero del oxígeno, del dióxido 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 [6].

La cementación comercial se puede llevar a cabo por medio de material sólido de cementación, gas rico en carbono, y cementación por líquido. En el primer proceso indicado, las piezas están rodeadas por un compuesto de cementación en un recipiente cerrado. El recipiente se calienta a la temperatura adecuada durante la cantidad de tiempo requerida, y luego se enfría con lentitud. Este es esencialmente un método por "lote" y no se presta para alta producción. Los compuestos comerciales de cementación suelen constar de carbón vegetal de madera dura, coque y ~20% de carbonato de bario como activador. El compuesto de cementación está en la forma de gruesas partículas o trozos, así que cuando la cubierta se sella sobre el recipiente, habrá dentro de éste suficiente aire atrapado para formar monóxido de carbono. Las principales ventajas de este método son que no se requiere una atmósfera preparada y es eficiente y económico para el procesamiento individual de pequeñas cantidades de piezas, o de grandes piezas masivas. Las desventajas son que no es muy adecuado para producir partes delgadas superficiales cementadas que se deben controlar a tolerancias reducidas; no puede proporcionar el estrecho control del carbono superficial que se obtiene mediante el método de cementación por gas; las piezas no se pueden templar directamente desde a temperatura de cementación, y se consume excesivo tiempo al calentar y enfriar la carga. Debido a la variación inherente en la profundidad de la región superficial y al costo de los materiales de cementación, este método por empaquetamiento no se utiliza en piezas que requieren una profundidad de la región externa inferior a 0.030 pulg y cuando las tolerancias son de por lo menos 0.010 pulg [6].

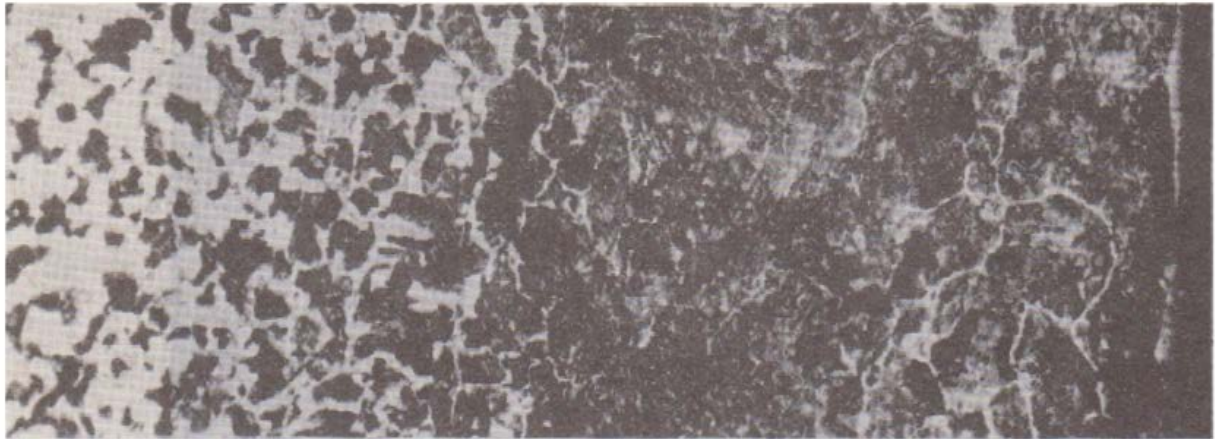


Fig. 1.31. Acero al 0.20% de C, cementado por empaquetamiento a 1,700 °F durante 6 h y enfriado en el horno. Atacado químicamente con nital al 2%, 30x [6].

1.8.8. TRATAMIENTO TÉRMICO DESPUÉS DE LA CEMENTACIÓN

Como el acero se cementa en la región de austenita, el templado directo desde la temperatura de cementación endurecerá tanto la parte externa como la interna si la rapidez de enfriamiento es mayor que la rapidez crítica de enfriamiento. El templado directo de los aceros de grano grueso suele dar lugar a 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 la condición de templado sin tratamiento térmico ulterior, debido a la gran cantidad de austenita retenida en la parte superficial endurecida. En la Fig. 1.32 se presenta un diagrama de varios tratamientos de endurecimiento de aceros para cementación, junto con las propiedades de la superficie externa endurecida y el centro de la pieza. Cuando una pieza ha sido cementada se endurece, la parte exterior aparecerá como una zona de martensita clara, seguida por una zona más oscura de transición (ver Fig. 1.33) [6].

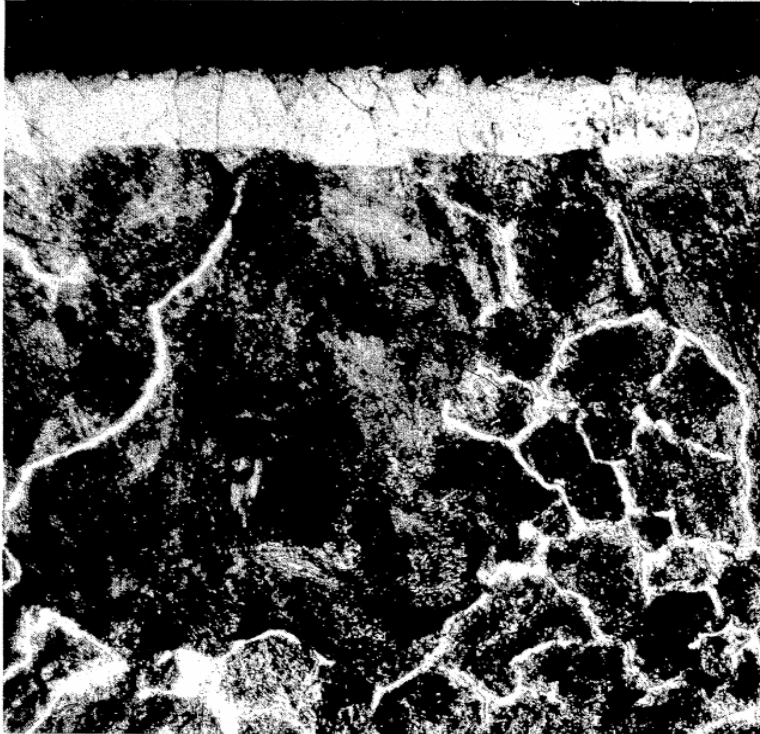


Fig. 1.32. Capa descarburizada de ferrita sobre la superficie de un acero de alto carbono recocido. Atacado químicamente con nital al 2%, 200x [6].

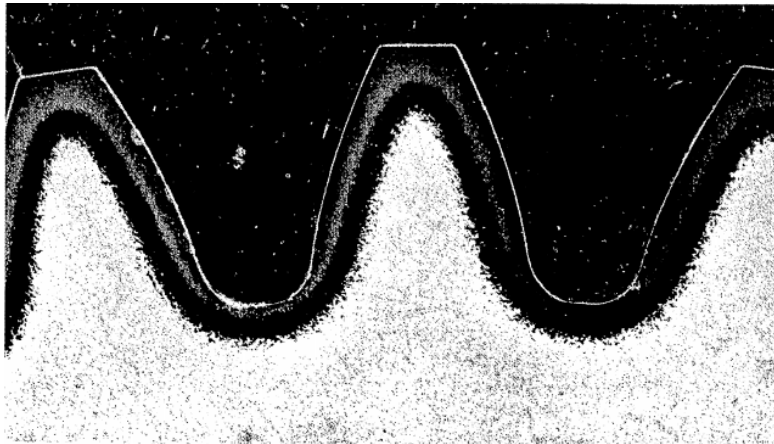


Fig. 1.33. Engrane apropiadamente cementada, templado y revenido. Atacado químicamente con nital al 2%, 7x [6].

La parte exterior dura o efectiva se mide desde la orilla exterior hasta la parte media de la zona oscura.

2. DISEÑO EXPERIMENTAL

En este capítulo, se detalla el proceso completo para llevar a cabo el estudio de desgaste tipo espiga sobre disco con el propósito de evaluar el comportamiento al desgaste de un acero SAE 1020 con y sin tratamiento termoquímico de cementación sólida considerando diferentes condiciones de carga. Primero, se realizará el maquinado de las probetas, que consiste en la fabricación de 16 discos de acero SAE 1020 con un diámetro de 50 mm y un espesor de 10 mm, junto con 16 espigas de punta semiesférica de acero SAE O1, cada una con un diámetro de 4 mm y una longitud de 25 mm. Además, se incluyen las especificaciones para el tratamiento termoquímico de cementación sólida que se aplicará a 8 de 16 discos, detallando también el proceso de post tratamiento térmico, simultáneamente, todas las espigas de acero SAE O1 son sometidas a un temple mediante el calentamiento a 850 °C, enfriado en aceite y revenido a 200 °C, enfriado en horno. Se presentan las combinaciones de variables bajo las cuales se llevarán a cabo los ensayos de desgaste, que comprenden en 8 ensayos en total por cada condición con y sin tratamiento termoquímico de cementación sólida, 3 cargas aplicadas, 1 velocidad de deslizamiento y 1 distancia de deslizamiento común.

La cantidad total de espigas y discos para cumplir con las condiciones mencionadas son 18 discos y 18 espigas, dejando el resto para ser utilizadas como respaldo para garantizar el cumplimiento de las condiciones de ensayo. Finalmente, se describe el proceso para determinar la dureza de los discos cementados y para medir el espesor de la capa cementada. El diseño experimental presentado establece un marco metodológico riguroso para la realización de pruebas de desgaste espiga sobre disco, lo que permitirá obtener datos precisos y confiables para el análisis posterior.

Se presenta el diagrama de flujo de la metodología experimental Fig. 2.1, que incluye el dimensionamiento y maquinado de las probetas, tratamientos termoquímicos y térmicos, y la ejecución de las pruebas de desgaste.

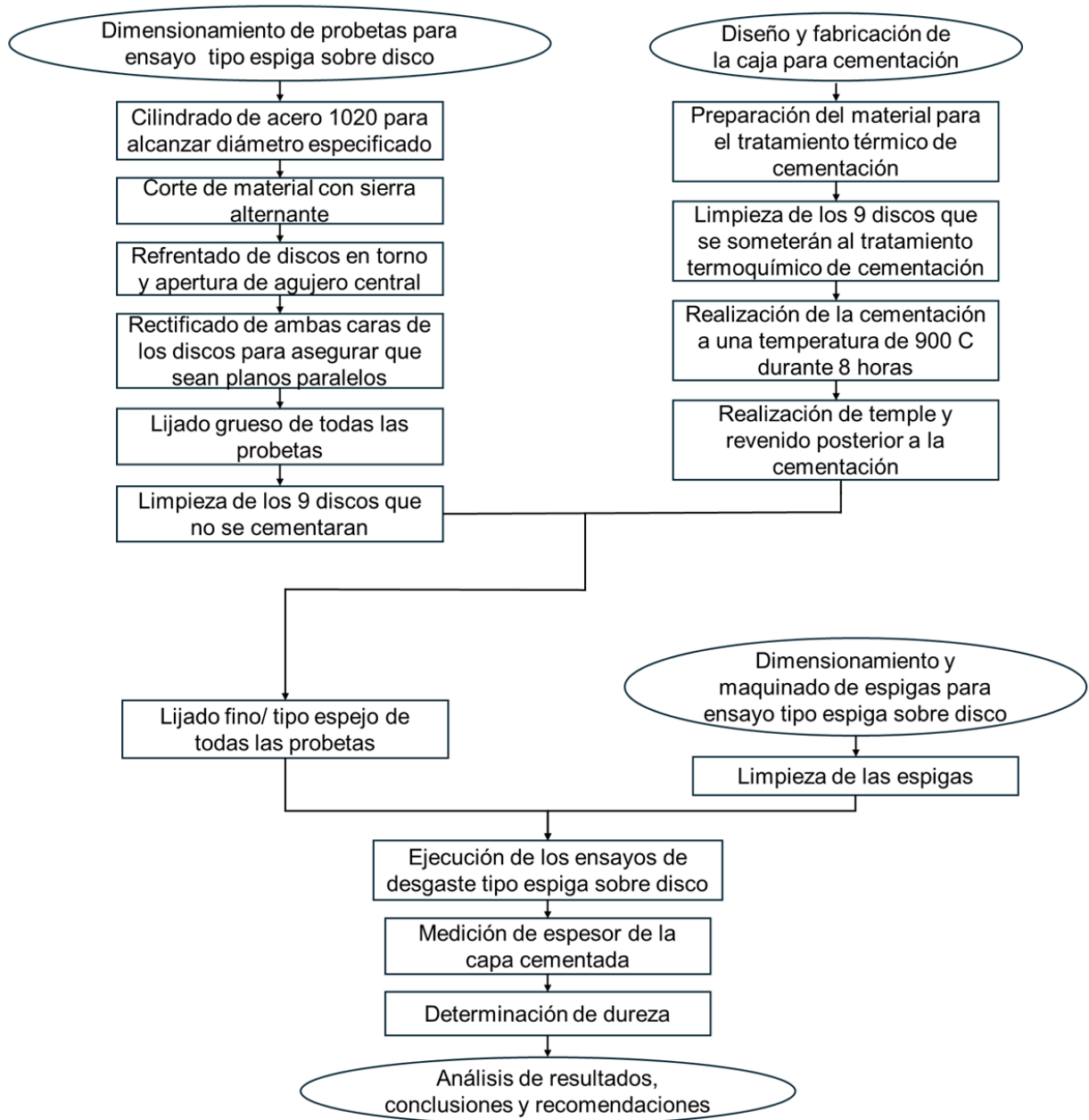


Fig. 2.1. Diagrama de flujo del diseño experimental.

2.1. DIMENSIONAMIENTO DE PROBETAS SELECCIONADAS PARA LOS ENSAYOS DE DESGASTE TIPO ESPIGA SOBRE DISCO

El dimensionamiento de las probetas para los ensayos de espiga sobre disco se lleva a cabo siguiendo las directrices del manual del módulo para ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco de la marca GUNT, específicamente el modelo TM 260.3. Este

equipo 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 1020 como también de la espiga de acero SAE O1. Estas dimensiones son cruciales para asegurar que los especímenes sean compatibles con el equipo de prueba y que las condiciones de desgaste sean uniformes y reproducibles a lo largo de los experimentos.

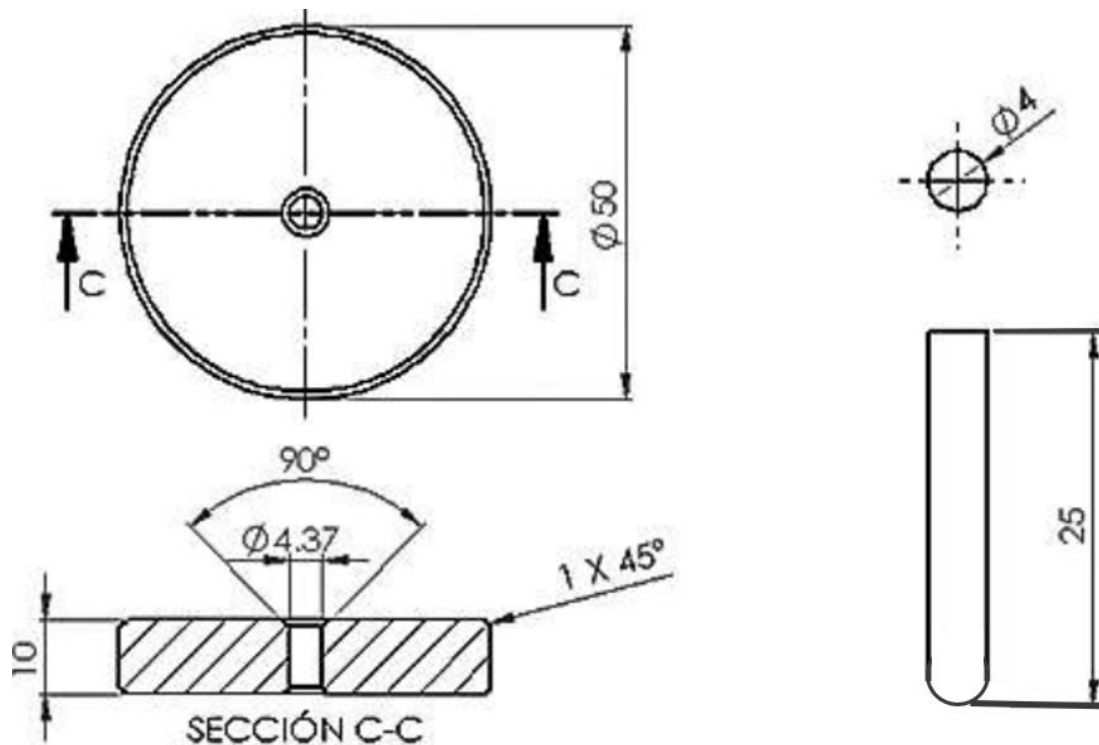


Fig. 2.2. Dimensiones de los especímenes a utilizar en el ensayo tipo espiga sobre disco, cotas en mm [7].

Este agujero permite fijar el disco al vaso portador mediante un perno; la holgura entre el perno y el disco elimina la necesidad de ajuste. Por su parte, la espiga tiene un diámetro de 4 mm y una longitud de 25 mm.

2.2. CONFORMADO DE PROBETAS

Los discos de acero SAE 1020 y las espigas de acero SAE O1 se fabrican a partir de una barras cilíndricas con un diámetro de 50.80 mm (2 pulg) y 12.7 mm (1/2 pulg), respectivamente. La composición química y durezas de cada barra se especifican en la Tabla 2.1.



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

Elemento Aleación	% en peso									HB
	C	Mn	Si	P	S	Cr	W	V	Fe	
SAE 1020	0.18-0.23	0.30-0.60	0.20	0.04	0.05				Balance	220
SAE O1	0.95	1.00	0.50	0.030	0.030	0.50	0.50	0.030	Balance	658

El maquinado de las probetas se realiza utilizando un torno convencional de la marca COMEC, modelo TGA 180 N, ubicado en la Unidad Productiva Metal Mecánica de la Escuela de Ingeniería Mecánica. El maquinado de los discos descritos en la tabla 2-2 comienza con un proceso de cilindrado para reducir el diámetro de la barra original de 50.80 mm hasta alcanzar los 50 mm. Luego, se lleva a cabo el corte inicial de los discos a un espesor de 15 a 16 mm utilizando una sierra industrial. Posteriormente, en el torno se refrentan ambas caras de los discos hasta obtener un espesor de disco de 10.8 mm y se perfora un agujero en cada uno de los discos utilizando una broca de 4.36 mm (11/64 de pulg). El maquinado de las espigas comienza con un proceso de corte de las espigas de 30 - 32 mm de longitud. Posteriormente se conforma la punta semiesférica y se refrenta en torno la cara plana hasta llegar a los 25.4 mm de longitud.


Finalmente, cada disco y espiga terminado es colocado en un recipiente con aceite para protegerlo contra la corrosión ver Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Maquinado de discos y espigas.

Corte con sierra, refrentado y lijado.	
1) Se realizó cortes en el acero (SAE 1020) haciendo uso de sierra industrial de ~15 mm, además se perfora un agujero de 11/64 pulg en cada disco tal como estudio de desgaste tipo espiga sobre disco, utilizando un SAE 1020 cementado y un acero SAE O1 [7]. Posteriormente, se realizó el corte del acero SAE O1 a 30 mm de longitud.	
2) Con el propósito de eliminar las imperfecciones superficiales provocadas durante el corte mediante sierra, se realizó una reducción de longitud mediante un maquinado en un torno y un posterior rectificando en ambas caras de cada disco y de las espigas hasta lograr que ambas caras estén completamente paralelas a 10.8 mm. Además, se realiza un conformado de una punta semiesférica en la espiga y un corte de la cara plana hasta lograr los 25.4 mm de longitud.	
Nota: Se realizó un biselado de 1 mm de espesor a 45° en cada disco obteniendo una cara de trabajo efectiva de 50.00 mm.	

Continúa.

Continuación,- Tabla 2.2. Maquinado de discos y espigas.

Corte con sierra, refrentado y lijado.	
3) Finalmente, se realizó el proceso de lijado en las caras que están en contacto, de 220 hasta 1,500. Se recomienda sumergirlas en aceite para reducir el efecto corrosivo del medio. Nota: para la ejecución del lijado se recomienda hacer uso de una cubierta de resina la cual permite una mejor sujeción, para la manipulación de cada espécimen.	

2.3. DISEÑO DE CAJA DE CEMENTACIÓN

El proceso de cementación se efectúa a temperatura de 900 °C A_{c3} durante 4 h alcanzándose contenidos de carbono en la capa superficial de 0.8 a 1.2% y espesores de 0.4 a 0.45 mm, de espesor.

Para la realización de la cementación las piezas se empaquetan en una caja con carbón vegetal colocado de tal manera que toda la superficie de las probetas se encuentre rodeadas carbón vegetal. Después la caja se cierra con una tapa y se hace la junta hermética con arcilla. Las cajas y las piezas contenidas dentro, se calientan hasta la temperatura de cementación (850 °C) y se mantienen durante 4 h.

La caja de cementación se fabricó de acero SAE A6 con ángulo estructural y lámina de acero de 1/8 de espesor, soldada y esmerilada. El diseño de la caja para cementación se basa en los resultados obtenidos por estudio de desgaste tipo espiga sobre disco, utilizando un SAE 1020 cementado y un acero SAE O1 [7], en la Fig. 2.2 se dichos resultados, según dicha investigación la condición óptima para realizar el tratamiento termoquímico de cementación se produce con una distancia de separación entre los discos de 7.50 mm. Tomando en consideración dicha distancia de separación óptima entre las caras de los 11 discos a cementar y las dimensiones de estos se estableció un diseño para el interior de la caja con las dimensiones que se presentan en la Fig. 2.3.

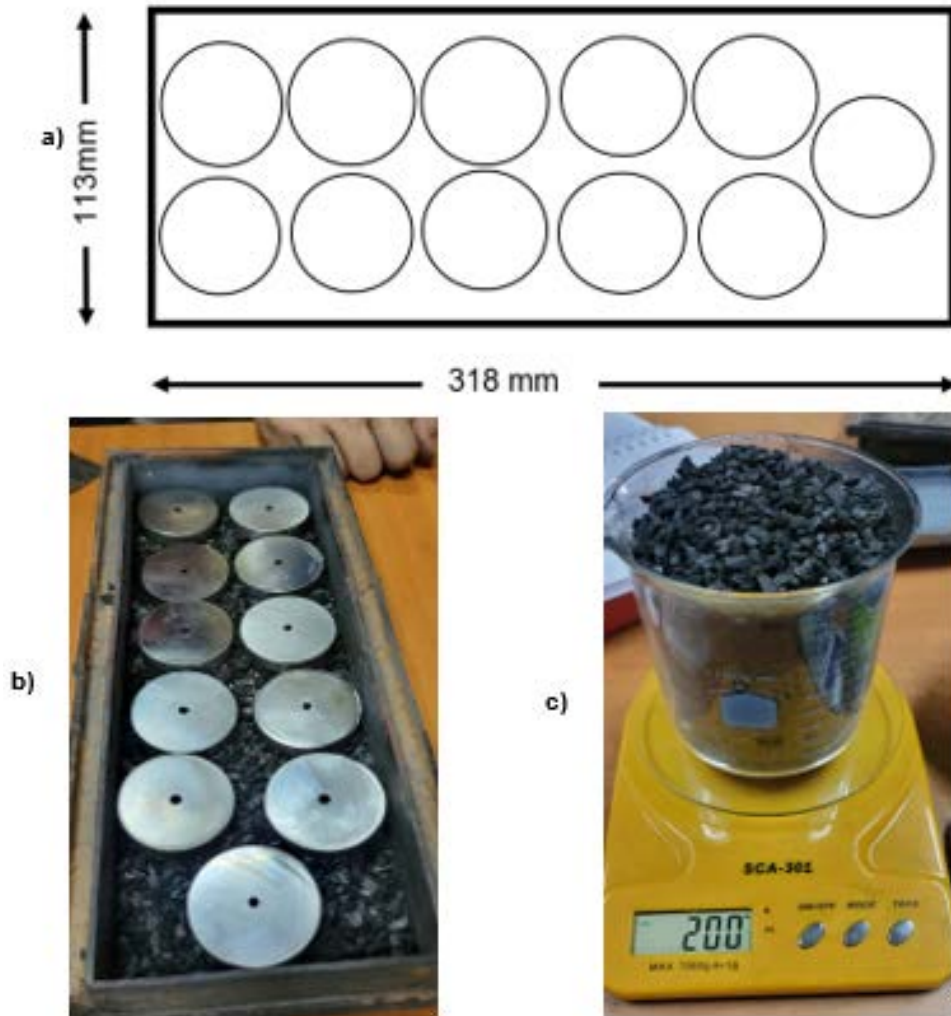


Fig. 2.3. Configuración previa a cementación: a) Dimensionamiento de caja de cementación; b) distribución y colocación de probetas de acero SAE 1020 en caja de tratamiento termoquímico de cementación sólida; y c) medición de masa de carbón vegetal de café necesario para realización de mezcla carbón + carbonato de bario.

Tras obtener el espesor mencionado se dispondrán los 9 discos restantes con el mismo arreglo presentado en la Fig. 2.3. se consideró que la caja para cementación tiene que estar herméticamente sellada, para lo cual tiene un canal en el contorno de la caja para que el contacto entre la tapadera y la misma pueda ser llenado mediante barro o arena con aglutinante. En la Fig. 2.4 se presenta el diseño externo de la caja y su tapadera.

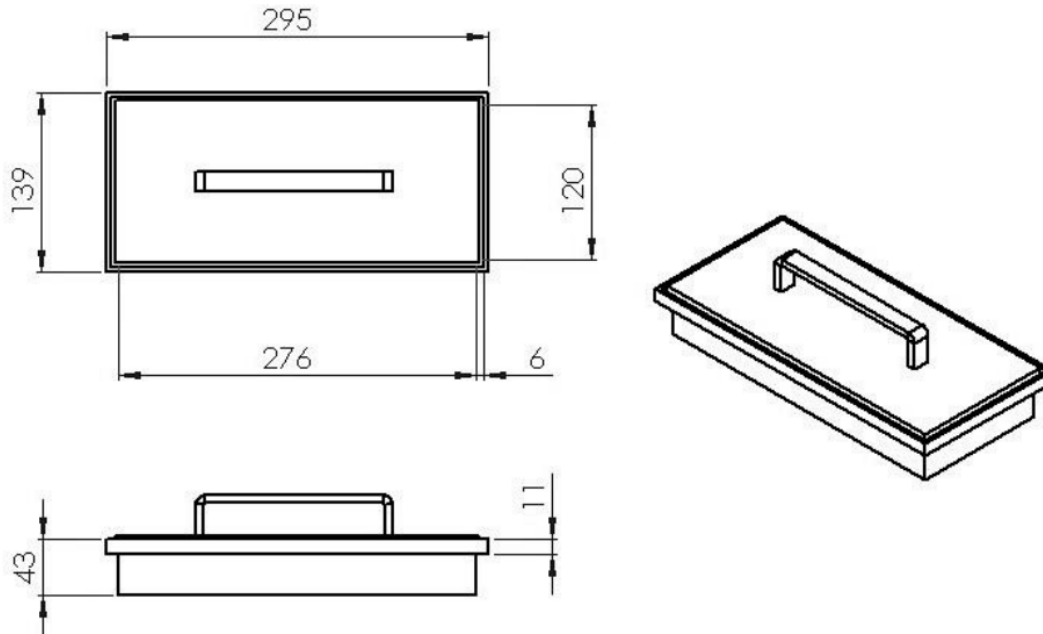


Fig. 2.4. Vista externa y dimensiones de caja de cementación.

2.4. TRATAMIENTO TÉRMICO DE RECOCIDO

Con el propósito de eliminar los esfuerzos producidos ante el maquinado de las probetas se realizará un tratamiento térmico de recocido a 850 °C durante un tiempo de 4 h tal como se describe en el diagrama de flujo (ver Fig. 2.5).

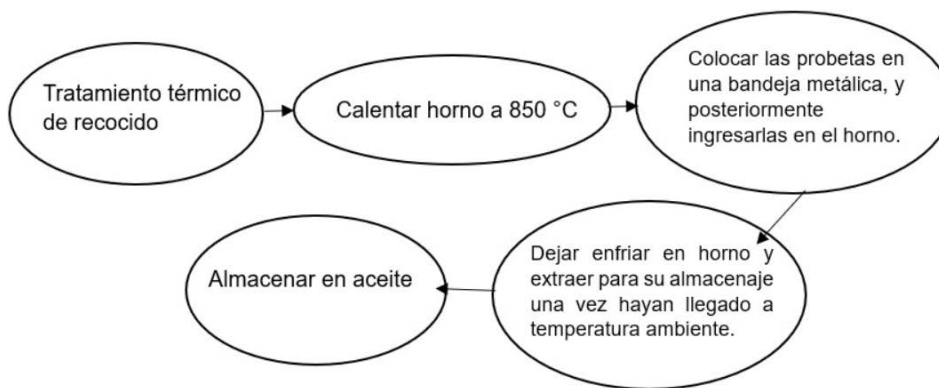


Fig. 2.5. Tratamiento térmico de recocido.

2.5. TRATAMIENTO TERMOQUÍMICO DE CEMENTACIÓN SÓLIDA UTILIZANDO CARBÓN VEGETAL

El proceso de cementación se realizó en un total de 11 de los discos para lo cual se describen posteriormente una serie de pasos que permitan obtener valores controlados de espesor de capa cementada. No obstante, previo a la realización del tratamiento térmico se debe realizar un proceso de preparación de la pieza a cementar.

2.6. TAMIZADO Y SECADO DEL CARBÓN VEGETAL

Durante el proceso de cementación sólida se debe controlar la humedad con el propósito de obtener el espesor de capa cementada deseada. Además, con el propósito de hacer ergonómico el espacio dentro de la caja de cementación y asegurar la interacción termoquímica uniforme del carbón vegetal en cada una de las probetas se deberá realizar un tamizado previo, así en la Fig. 2.6 se describe el proceso de tamizado y secado.

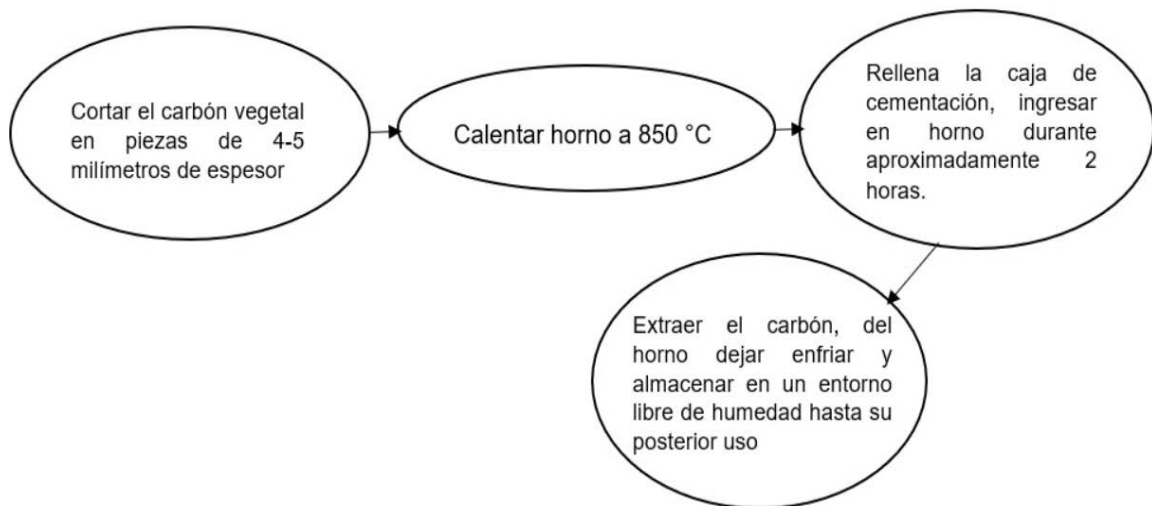







Fig. 2.6. Tamizado y secado de carbón vegetal de café.

2.7. PREPARACIÓN DE LA PIEZA A CEMENTAR Y CEMENTACIÓN SÓLIDA UTILIZANDO CARBÓN VEGETAL

El proceso de cementación sólida (ver Tabla 2.3), se describe el proceso a seguir durante la preparación de la pieza a cementar y el proceso de cementación.

Tabla 2.3. Proceso de cementación sólida.

Limpieza	
1) Realizar limpieza con jabón líquido y agua de grifo con el propósito de retirar cualquier resto de grasas.	
2) Realizar limpieza con soda caustica y agua desmineralizada o de grifo agitando durante 5 min.	
3) Realizar secado haciendo uso de pinza desestabilizada para evitar la contaminación de las probetas durante su manipulación.	
Cementación sólida utilizando carbón vegetal	
4) Haciendo uso de la caja para cementación colocar una capa de 0.7 mm de mezcla carburante (80% en peso de carbón vegetal + 20% en peso carbonato de bario); finalmente, colocar las piezas a cementar haciendo uso de pinzas.	
5) Colocar otra capa de 0.7 mm de mezcla carburante a manera de que las piezas a cementar se encuentren completamente inmersas.	
6) Haciendo uso de arcilla colocar en los canales que están a los bordes de la caja de cementación.	
7) Encender el horno y llevar a la temperatura de 1,000 °C. posteriormente ingresar la caja de cementación y esperar 1 h hasta lograr la temperatura de ~900 °C dentro de la caja de cementación. Mantener temperatura durante 8 h.	
8) La Posteriormente realizada la cementación apagar el horno y retirar la caja de cementación hasta que el horno se encuentre frío, retirar las piezas cementadas y realizar posterior pulido de caras.	

2.8. TEMPLADO DE ESPIGAS

En la Tabla 2.4 se presenta el proceso de tratamiento térmico de espigas seguido, el cual consiste en temple y revenido de espigas.

Tabla 2.4. Temple de espigas.

Limpieza de espigas	
1) Realizar limpieza con jabón líquido y agua de grifo con el propósito de retirar cualquier resto de grasas	
2) Realizar limpieza con soda caustica y agua desmineralizada o de grifo agitando durante 5 min.	
3) Realizar secado haciendo uso de pinza desestabilizada para evitar la contaminación de las probetas durante su manipulación	
Templado de espigas	
1) Calentar el horno a 815 °C hasta homogeneizar la temperatura	
2) Introducir las espigas en una cesta metálica haciendo uso de pinzas, guantes y mangas y mantener durante 30 min.	
3) Retirar pieza del horno haciendo uso de pinzas, guantes, y mangas y sumergirlas inmediatamente en aceite.	
4) Agitar medio de temple en aceite	
Revenido de espigas	
1) Calentar horno a 200 °C hasta homogeneizar la temperatura.	
2) Introducir las espigas en una cesta metálica haciendo uso de pinzas, guantes y mangas y mantener durante 30 min	
3) Retirar pieza del horno haciendo uso de pinzas, guantes, y mangas y enfriarlos en aire.	

2.9. POSTRATAMIENTO TÉRMICO A LA CEMENTACIÓN

Se realizará un proceso de temple y revenido a los 11 discos cementados, tal como se presenta en la Fig. 2.7, el cual se realizará en horno a 850 °C correspondiendo a la temperatura de temple de la zona superficial de alto carbono.

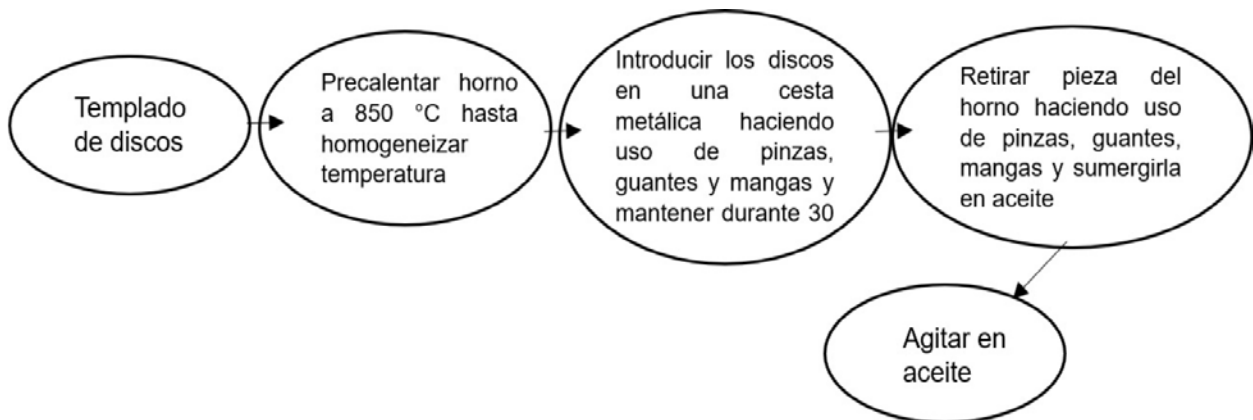


Fig. 2.7. Postratamiento térmico templado de discos SAE 1020 previamente cementado.

El enfriamiento se hace en aceite para posteriormente volver a colocar la pieza en el horno para el proceso de revenido Fig. 2.8 a 200 °C durante 1 h para que finalmente la pieza se enfríe al aire libre hasta la temperatura ambiente.



Fig. 2.8. Postratamiento térmico de revenido de discos SAE 1020 previamente templados.

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

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

Para los 11 discos cementados y no cementados, el proceso de limpieza consiste en un lavado con agua y jabón líquido a modo de retirar los residuos del aceite en el que ha estado guardado tras el proceso de maquinado luego se les realiza un proceso de cesado con aire caliente.

Después del proceso de limpieza respectivo a la condición del espécimen se realizará un proceso de lijado manual de las superficies que estarán en contacto con la espiga durante la realización del ensayo.

Tomando en cuenta que en la caja se cementaran 22 discos los cuales 11 serán tomando para nuestros estudios, la superficie de trabajo será la que se encuentre entre los 11 discos superiores y los 11 discos inferiores, una vez identificada la superficie de trabajo, se procede a realizar sobre este el lijado fino con papeles de SIC número 100, luego se utilizan hojas menos bastas (210, 300 y 400), hasta llegar a las más finas (500 y 600). En la Fig. 2.9 se presenta un ejemplo de la superficie de un disco posterior al proceso de lijado.



Fig. 2.9. Disco de acero SAE 1020 posterior al proceso de lijado [7].

Un proceso similar se realiza en la superficie de trabajo de la espiga que se someterá al ensayo, la diferencia radica en que, para dicha sección se utilizan los números de lija anteriormente mencionada, aunque el proceso continúa hasta utilizar hojas más finas 1,000, hasta llegar a la hoja final número 1,500.

Luego los especímenes se secan utilizando aire caliente, para asegurar la remoción de la humedad, así dicho proceso se realiza con mayor intensidad en los discos, debido a que el acero SAE 1020 no presenta resistencia a la oxidación, a diferencia del acero SAE O1. Posteriormente, los discos son envueltos en papel absorbente y se guardan en bolsas plásticas con cierre hermético para protegerlos de la oxidación.

2.11. ENSAYO DE DESGASTE TIPO ESPIGA SOBRE DISCO

Antes de realizar los ensayos de desgaste, se tiene que medir la masa de cada espiga y disco que serán sometidos al estudio de desgaste, dicho proceso de medición de masa se realizara en balanza semianalítica (ver Fig. 2.10).



Fig. 2.10. Balanza semianalítica marca aczel.

Los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco se realizan en un módulo para ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco marca GUNT, modelo TM 260.3, el cual se ocupa como complemento al módulo básico para estudios tribológicos de la misma marca, modelo TM 260, los cuales se encuentra ubicados en el laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica (ver Fig. 2.11).

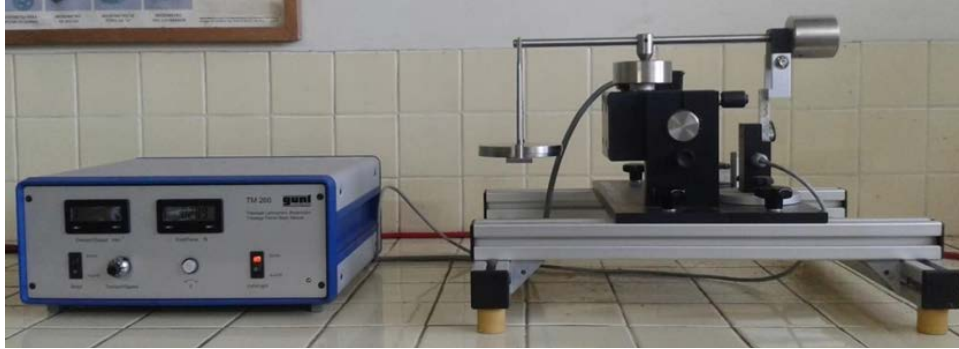


Fig. 2.11. Módulo para ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco marca gunt, tm 260.3.

El módulo para ensayos tipo espiga sobre disco permite posicionar una espiga con una superficie de contacto (plana o hemisférica) perpendicular a un disco, este último se fija a un vaso mediante un perno, permitiendo así mediante el árbol de accionamiento del módulo que el disco gire produciendo un movimiento de deslizamiento entre las dos superficies en contacto de los especímenes cuya trayectoria es un círculo en la superficie del disco; para el caso de los experimentos a realizar se utilizan espigas de superficie plana. La espiga se coloca contra el disco y se aplica una carga constante por medio de un brazo al cual se le agregan pesos, en la Fig. 2.12 se presenta un esquema del módulo para ensayos tipo espiga sobre disco en el que se enumeran sus componentes más importantes.

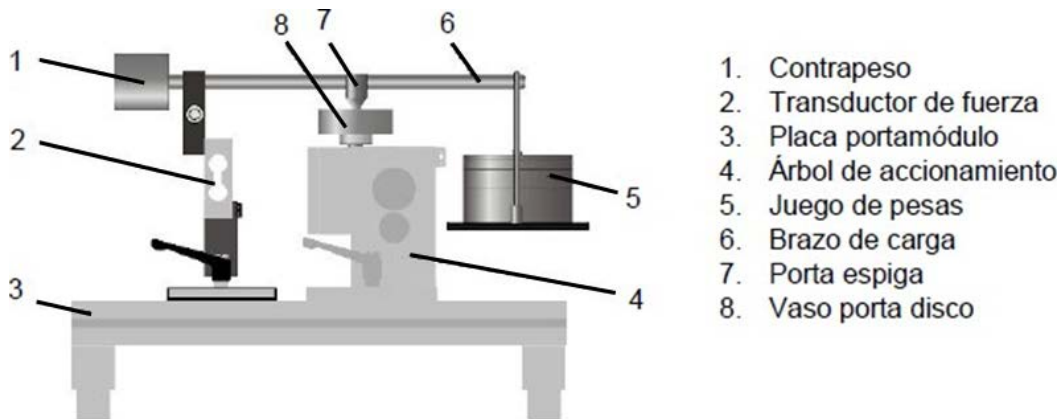


Fig. 2.12. Módulo para ensayos tipo espiga sobre disco con sus principales componentes señalados.

Los resultados de desgaste se reportarán separadamente como la pérdida de masa en gramos para la espiga y el disco. La cantidad de desgaste es determinada

comparando el peso tomado antes y después estudio.

Los resultados de desgaste normalmente son obtenidos realizando los ensayos para una distancia de deslizamiento, carga y velocidad seleccionada, en la Tabla 2.5 y Tabla 2.6 se presentan las diferentes variables del experimento para las condiciones de los discos cementados y no cementados, se realizarán 3 experimentos por cada una de las 3 variantes de carga.

Tabla 2.5. Variables bajo las que se realizan los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco acero SAE 1020 no cementado.

Condición	Variables			
	Velocidad, rpm	Distancia de deslizamiento, m	Carga. N	Nº de probeta
Acero SAE 1020 no cementado	46	2,000	15	15
			15	16
			15	17
			15	21
			20	12
			20	19
			20	22
			25	8
			25	13

Tabla 2.6. Variables bajo las que se realizan los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco acero SAE 1020 cementado.

Condición	Variables			
	Velocidad, rpm	Distancia de deslizamiento, m	Carga. N	Nº de probeta
Acero SAE 1020 cementado	46	2,000	15	3
			15	5
			15	7
			20	1
			20	10
			20	11
			25	4
			25	6

La velocidad a la que se realizarán todos los experimentos corresponde a 46 RPM ~0.05, la cual es una velocidad recomendada para realizar los ensayos tipo espiga sobre disco el módulo con que se cuenta para hacer dichos ensayos permite ajustar con el

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

El diámetro de la trayectoria de deslizamiento se obtendrá realizando una medición en el disco de prueba que incluye el módulo de ensayos tipo espiga sobre disco, en dicho espécimen se realizarán dos mediciones, la del diámetro interno de la huella y la del diámetro externo, los datos obtenidos se sustituirán en la Ecuación. 2.1 para obtener un valor en rpm.

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

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

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

$$20t = S/v \quad (2.2)$$

donde: t es el tiempo, s;
 s es la distancia de deslizamiento, m; y
 v es la velocidad lineal de deslizamiento, m/min.

Así, debido a que la velocidad de deslizamiento es la misma para todos los experimentos (0.05 m/s) y se trabajara con dos distancias de deslizamiento diferentes, el tiempo requerido para 2,000 m es de 19,620 s.

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

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

donde: μ es el coeficiente de fricción;

f_f es la fuerza de fricción, N, y

F es la carga aplicada, N.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta de forma resumida los resultados obtenidos y análisis de resultados está estructurado en 4 partes:

- Resultados obtenidos de los ensayos de desgastes;
- Determinación de espesor de capa cementada metalográficamente;
- Determinación de durezas; y
- Análisis de resultados,

3.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DESGASTE

En este apartado, se presentan los resultados obtenidos de la parte experimental, y se detalla de forma ordenada mediante el uso de tablas y figuras comparativas de las pérdidas de masa después de realizado los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco, tanto en espigas como en discos clasificados según la respectiva condición superficial y carga aplicada.

También, se presentan las curvas de coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento para cada una de las condiciones ensayadas con espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas sobre discos de acero SAE 1020 con tratamiento térmico de cementación sólida. En la Tabla 3.1 se presenta los resultados de pérdida de masa en ensayos de discos recocidos. En la Tabla 3.2 se presenta los resultados de pérdida de masa en ensayos de discos cementados. En la Tabla 3.3 se presenta los resultados de pérdida de masa en espigas ensayadas en discos recocidos. Finalmente, en la Tabla 3.4 se presenta los resultados de pérdida de masa en espigas ensayadas en discos cementados.

En la Fig. 3.1 se presenta una comparación entre las pérdidas de masa promedio de los discos cementados versus los discos recocidos, así se observa una mayor pérdida de masa en los discos que fueron sometidos a cementación.

Tabla 3.1. Pérdida de masa en discos recocidos ensayados con espiga de acero SAE O1 templadas a 815 °C y revenidas a 200 °C.

Carga, N	Ensayo	Masa inicial, g	Masa final, g	Pérdida de masa, g	Pérdida de masa promedio, g	DE
15	1	154.4464	154.4264	0.0200	0.013	0.006
	2	152.7325	152.7194	0.0131		
	3	151.4540	151.4481	0.0059		
20	1	151.9300	151.8301	0.0999	0.058	0.031
	2	154.2345	154.2065	0.027		
	3	154.3401	154.2940	0.0461		
25	1	147.5970	147.5280	0.0690	0.064	0.027
	2	152.3886	152.3534	0.0352		
	3	154.5568	154.4680	0.0888		

Tabla 3.2. Pérdida de masa en discos cementados ensayados con espiga de acero SAE O1 templadas a 815 °C y revenidas a 200 °C.

Carga, N	Ensayo	Masa inicial, g	Masa final, g	Pérdida de masa, g	Pérdida de masa promedio, g	DE
15	1	152.9526	152.8723	0.0803	0.046	0.026
	2	152.7244	152.6837	0.0407		
	3	153.0341	153.0181	0.0171		
20	1	153.7792	153.5340	0.2452	0.145	0.083
	2	154.1625	154.0163	0.1462		
	3	154.1214	154.0788	0.0426		
25	1	151.9245	151.6803	0.2442	0.233	0.036
	2	153.0228	152.8295	0.1933		
	3	150.3010	150.0395	0.2615		

Tabla 3.3. Pérdida de masa en espigas ensayadas en discos recocidos.

Carga, N	Ensayo	Masa inicial, g	Masa final, g	Pérdida de masa, g	Pérdida de masa promedio, g	DE
15	1	2.3135	2.3091	0.0034	0.003	0.000
	2	2.3318	2.3296	0.0032		
	3	2.3219	2.3183	0.0026		
20	1	2.3272	2.3232	0.0050	0.004	0.001
	2	2.3196	2.3163	0.0043		
	3	2.3113	2.3076	0.0037		
25	1	2.319	2.313	0.005	0.005	0.001
	2	2.317	2.313	0.004		
	3	2.324	2.319	0.005		

Tabla 3.4. Pérdida de masa en espigas ensayadas en discos cementados.

Carga, N	Ensayo	Masa inicial, g	Masa final, g	Pérdida de masa, g	Pérdida de masa promedio, g	DE
15	1	2.3208	2.3164	0.0044	0.006	0.001
	2	2.3025	2.2972	0.0053		
	3	2.3292	2.3225	0.0068		
20	1	2.3112	2.3049	0.0063	0.006	0.001
	2	2.3405	2.3341	0.0054		
	3	2.3323	2.3271	0.0052		
25	1	2.3163	2.3099	0.0066	0.008	0.001
	2	2.2951	2.2878	0.0077		
	3	2.3202	2.3095	0.0107		

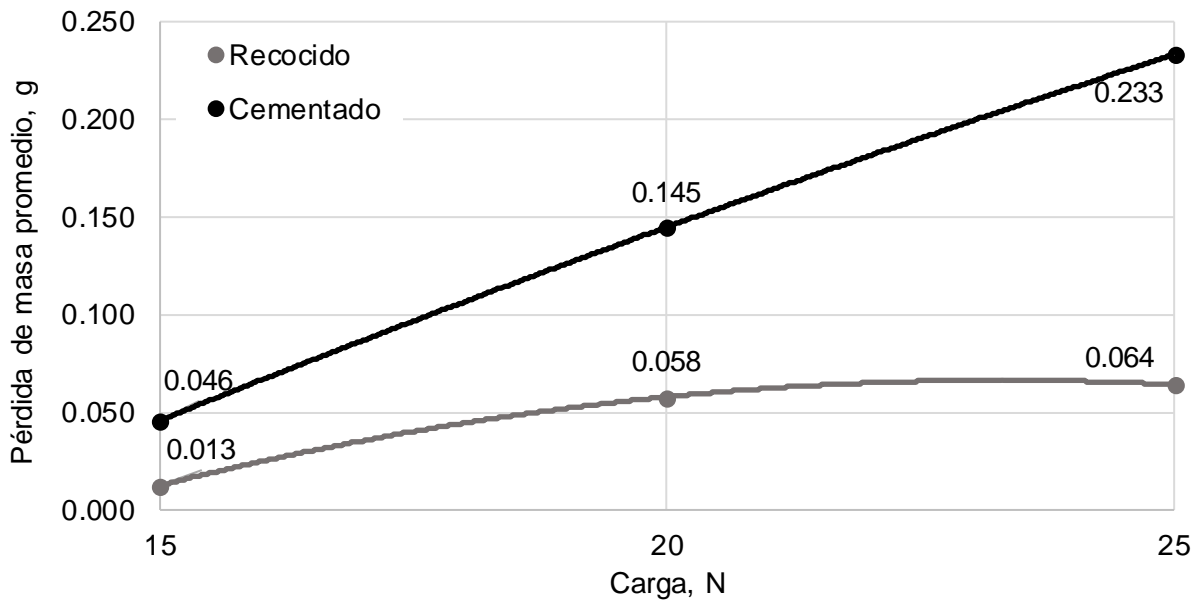


Fig. 3.1. Pérdidas de masa en función de las cargas aplicadas para discos recocido y cementados.

De la misma manera, en la Fig. 3.2 se presenta el mismo comportamiento en la pérdida de masa promedio de las espigas utilizadas con cada disco, mayor pérdida en los ensayos con discos cementadas.

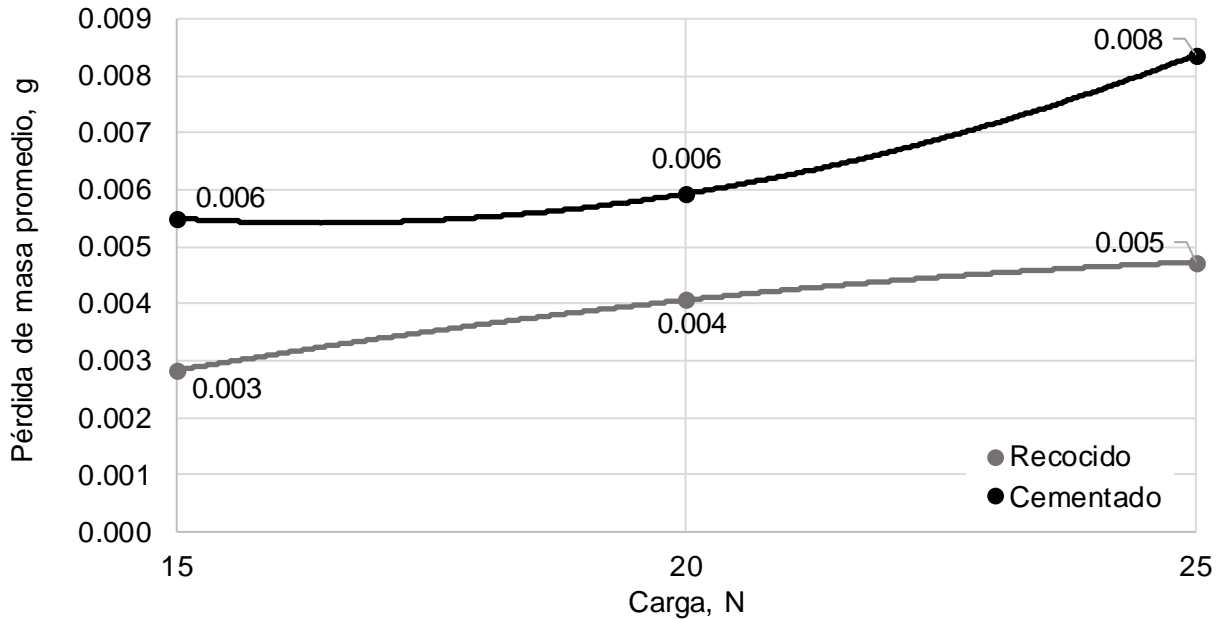


Fig. 3.2. Pérdidas promedio de masa en las espigas.

En la Fig. 3.3 se presentan las curvas de los coeficientes de fricción obtenidas en los ensayos espiga sobre disco en condición de recocido en función de la distancia de deslizamiento recorrida durante 2,000 m a una carga aplicada de 15 N, para tres ensayos y el promedio de los mismos.

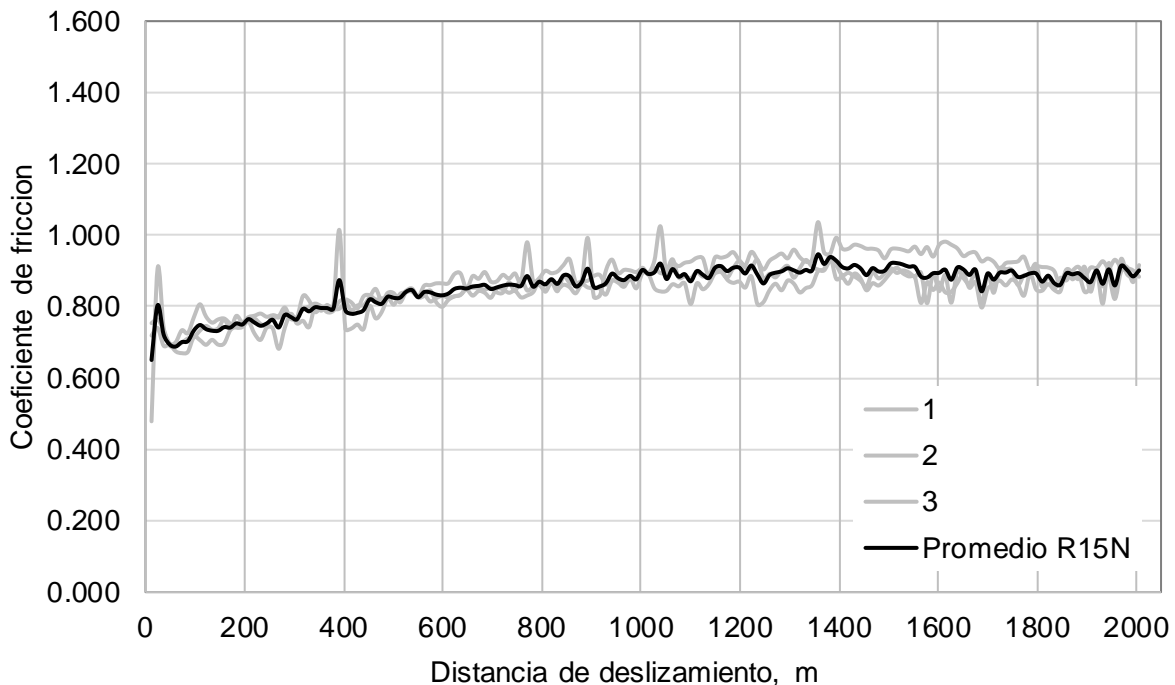


Fig. 3.3. Variaciones del coeficiente de fricción de discos recocidos a una carga de 15 N.

En la Fig. 3.4 se presentan las curvas de los coeficientes de fricción obtenidas en los ensayos espiga sobre disco en condición de recocido en función de la distancia de deslizamiento recorrida durante 2,000 m a una carga aplicada de 20 N, para tres ensayos y el promedio de los mismos.

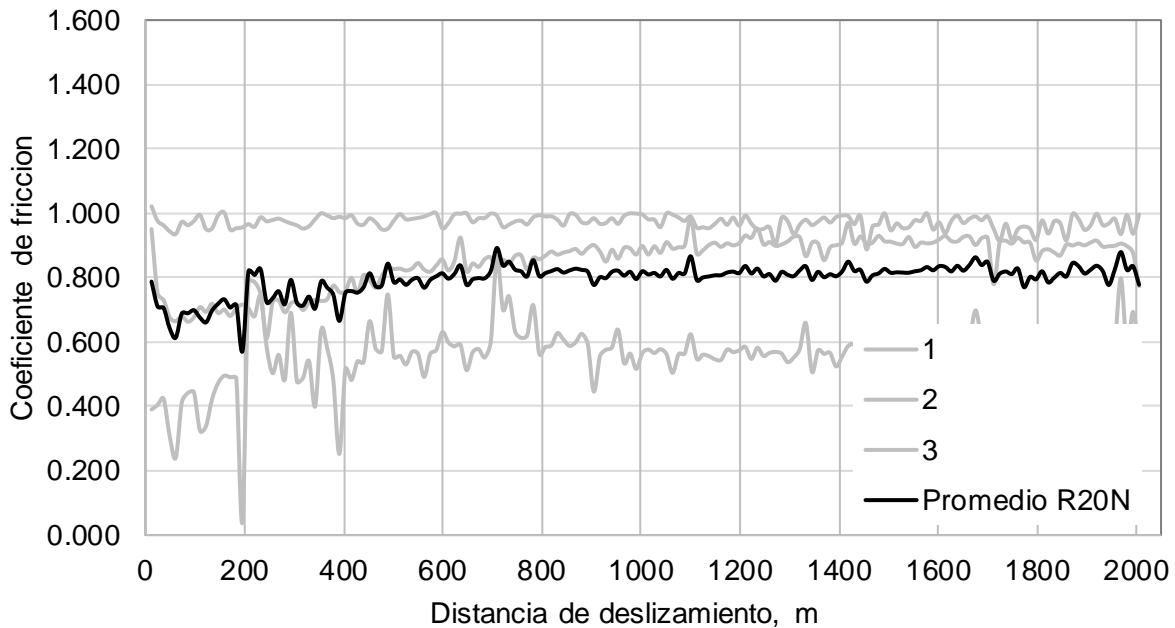


Fig. 3.4. Variaciones del coeficiente de fricción de discos recocidos a una carga de 20 N.

En la Fig. 3.5 se presentan las curvas de los coeficientes de fricción obtenidas en los ensayos espiga sobre disco en condición de recocido en función de la distancia de deslizamiento recorrida durante 2,000 m a una carga aplicada de 25 N, para tres ensayos y el promedio de los mismos.

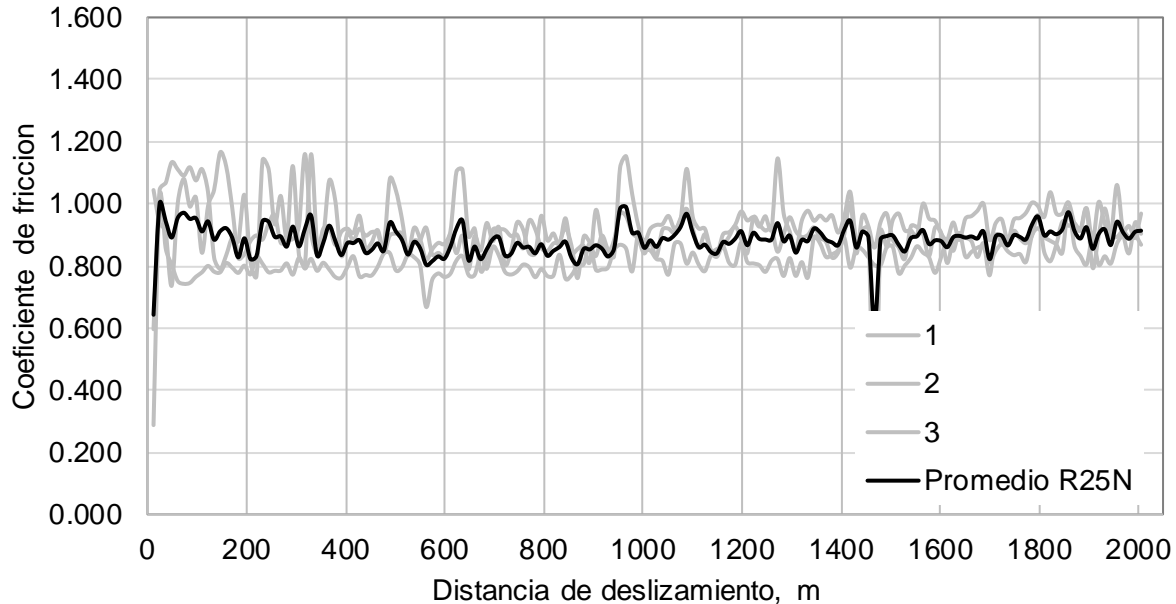


Fig. 3.5. Variaciones del coeficiente de fricción de discos recocidos a una carga de 25 N.

En la Fig. 3.6 se presentan las curvas de los coeficiente de fricción obtenidas en los ensayos espiga sobre disco en condición de cementados con postratamiento térmico de temple y revenido a 200 °C en función de la distancia de deslizamiento recorrida durante 2,000 m a una carga aplicada de 15 N, para tres ensayos y el promedio de los mismos.

En la Fig. 3.7 se presentan las curvas de los coeficiente de fricción obtenidas en los ensayos espiga sobre disco en condición de cementados con postratamiento térmico de temple y revenido a 200 °C en función de la distancia de deslizamiento recorrida durante 2,000 m a una carga aplicada de 20 N, para tres ensayos y el promedio de los mismos.

En la Fig. 3.8 se presentan las curvas de los coeficiente de fricción obtenidas en los ensayos espiga sobre disco en condición de cementados con postratamiento térmico de temple y revenido a 200 °C en función de la distancia de deslizamiento recorrida durante 2,000 m a una carga aplicada de 25 N, para tres ensayos y el promedio de los mismos.

Los resultados se obtuvieron tomando nota de las mediciones de fuerza de fricción registradas durante los ensayos, y luego se obtuvo un resumen comparativo de coeficientes de fricción utilizando la Ec. 2.3.

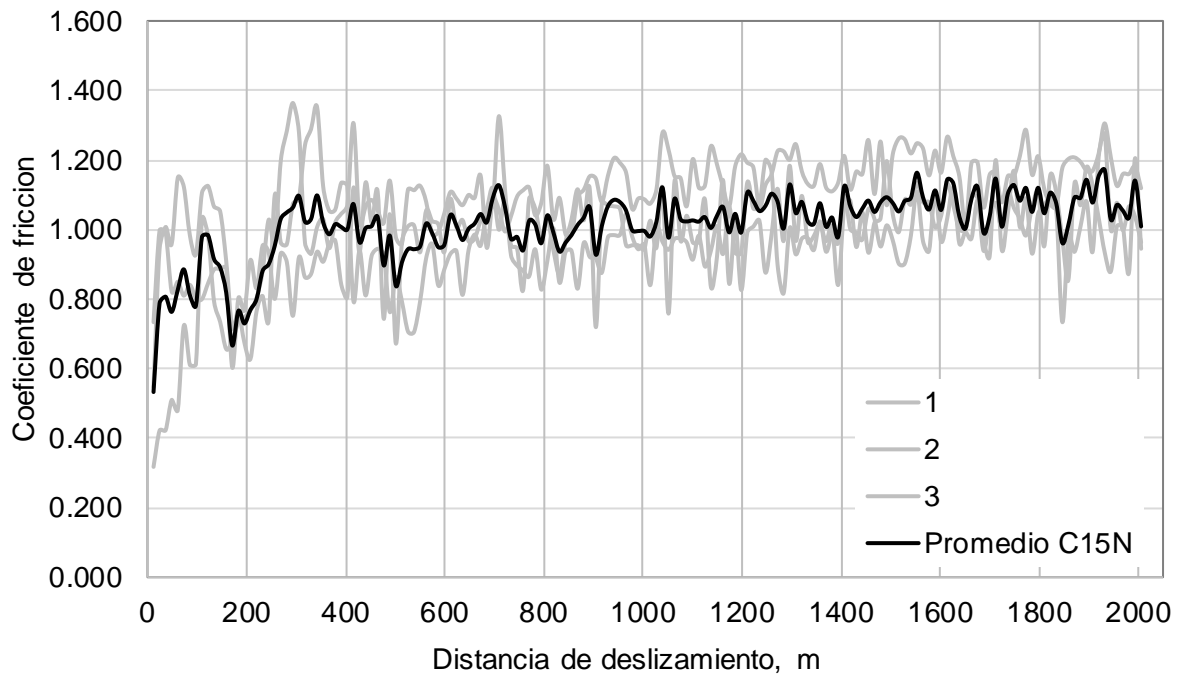


Fig. 3.6. Variaciones del coeficiente de fricción de discos cementados a una carga de 15 N.

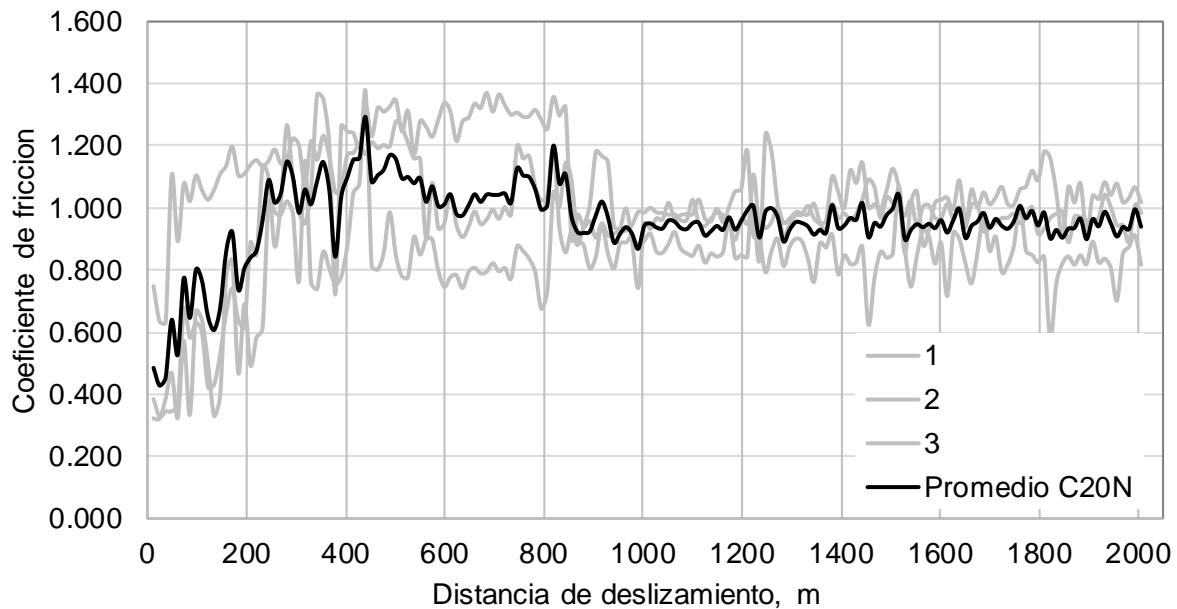


Fig. 3.7. Variaciones del coeficiente de fricción de discos cementados a una carga de 20 N.

Conocidas las tendencias del comportamiento promedio del coeficiente de fricción durante los ensayos para cada una de las condiciones planteadas es posible comparar gráficamente las tendencias de desgaste según condición superficial y carga aplicada.

Así, en la Fig. 3.9 se presenta la variación del coeficiente de fricción promedio para cada condición superficial y una carga aplicada de 15 N.

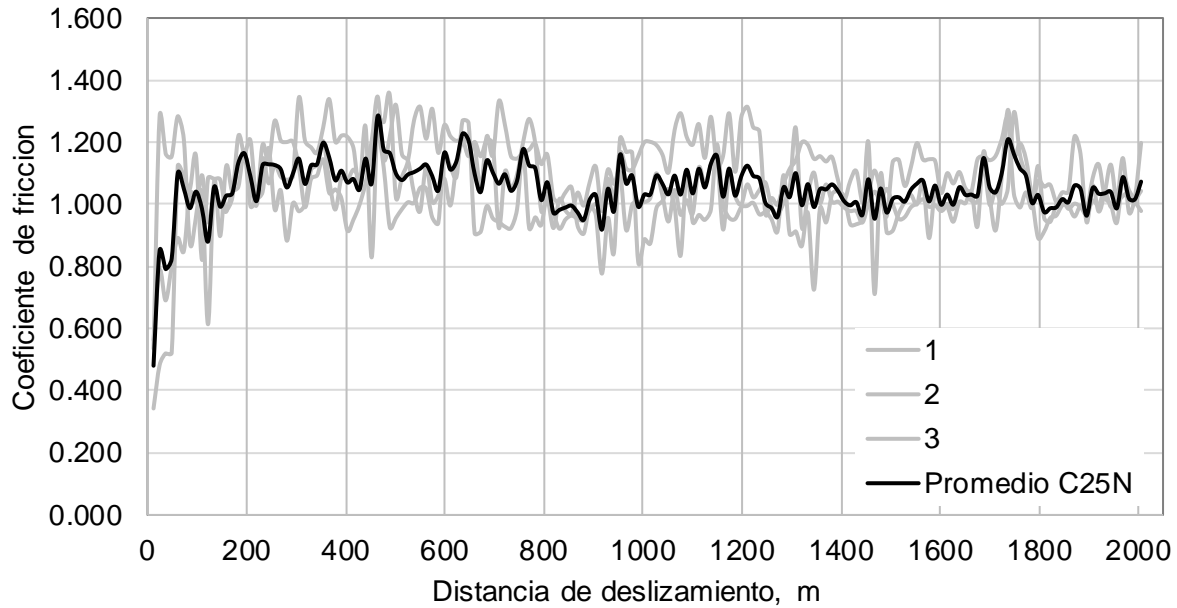


Fig. 3.8. Variaciones del coeficiente de fricción de discos cementados a una carga de 25 N.

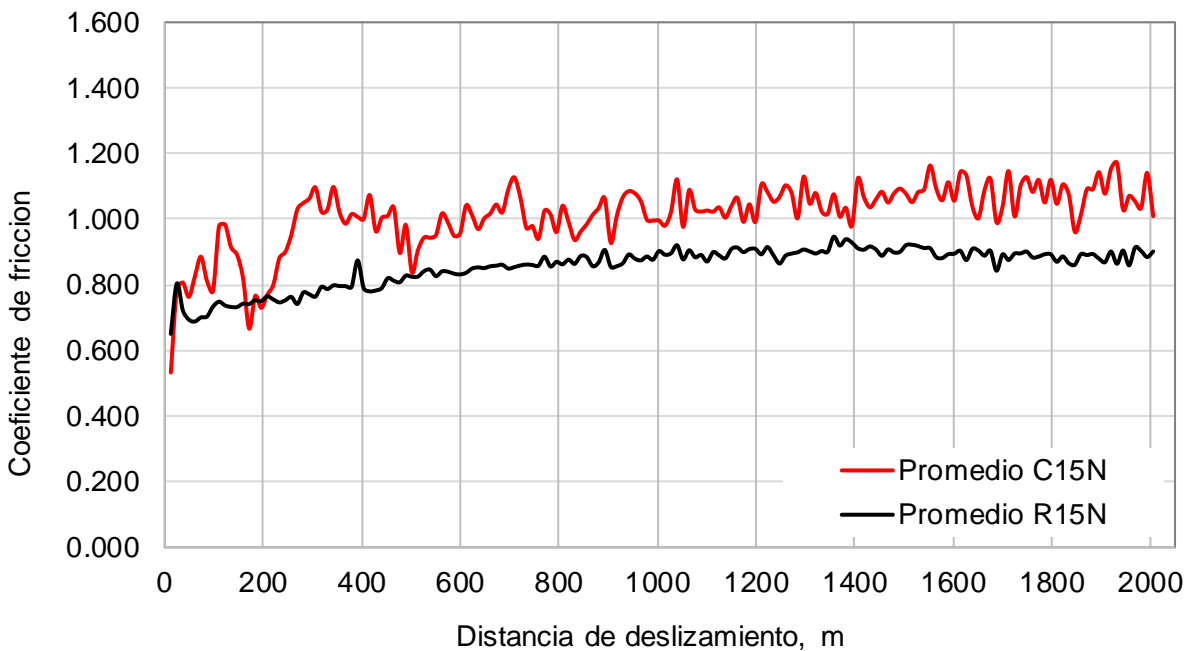


Fig. 3.9. Variaciones promedio del coeficiente de fricción de a una carga de 15 N.

De la misma manera, en las Fig. 3.10 y Fig. 3.11 se presentan las variaciones del coeficiente de fricción promedio para ambas condiciones superficiales y cargas aplicadas de 20 y 25 N, respectivamente.

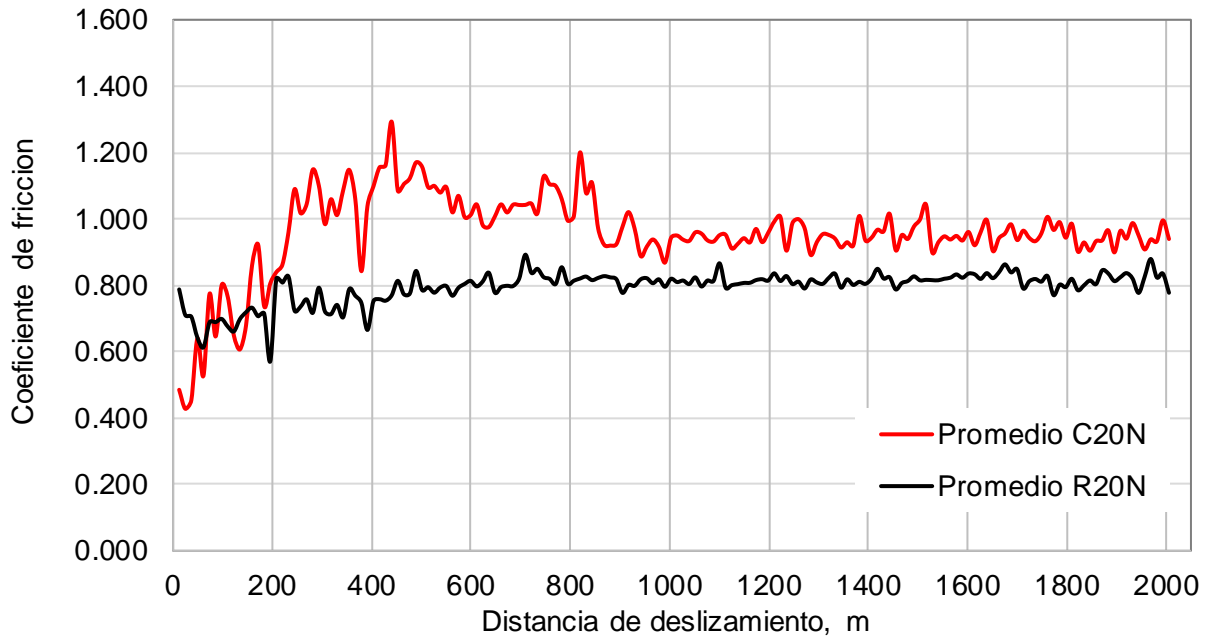


Fig. 3.10. Variaciones promedio del coeficiente de fricción de a una carga de 20 N.

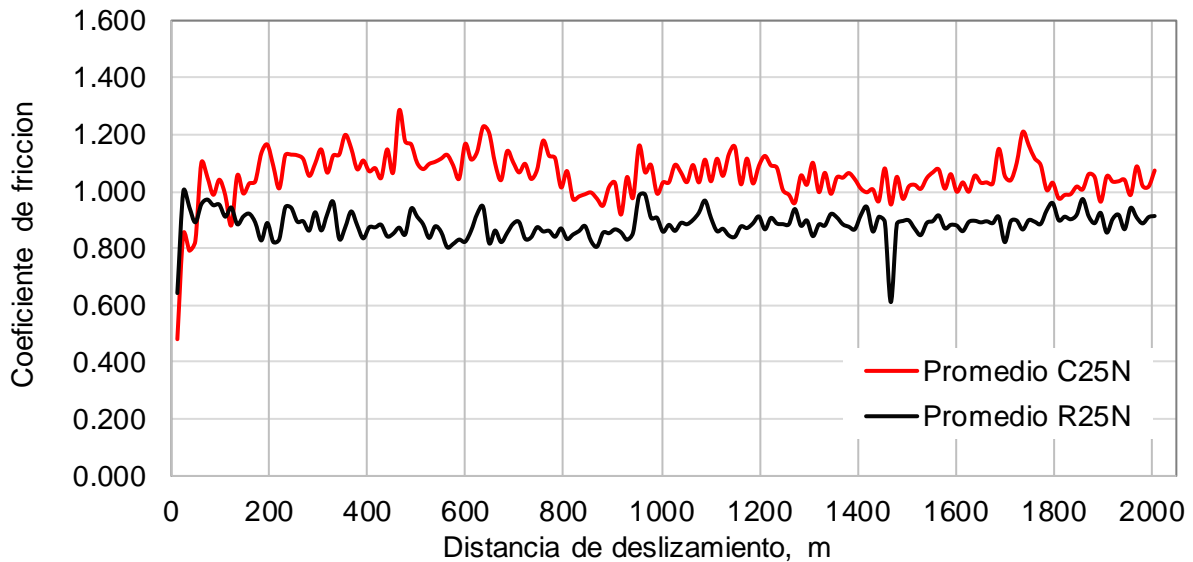


Fig. 3.11. Variaciones promedio del coeficiente de fricción de a una carga de 25 N.

Para las tres condiciones de carga se observa el mismo comportamiento, en el cual tiene mayor coeficiente de fricción en los ensayos con discos cementados en comparación con los ensayos con discos que solo fueron recocidos.

3.2. DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DE CAPA CEMENTADA

Mediante un estudio metalográfico en 2 de los 12 discos cementados, se determinó la microestructura y distribución de los granos y fases presentes en los discos con tratamiento termoquímico de cementación sólida.

Los resultados obtenidos del estudio metalográfico consistieron en la documentación fotográfica de los cambios microestructurales en una sección transversal del disco de 12.3 mm de espesor, tal como se presenta en la Fig. 3.12.

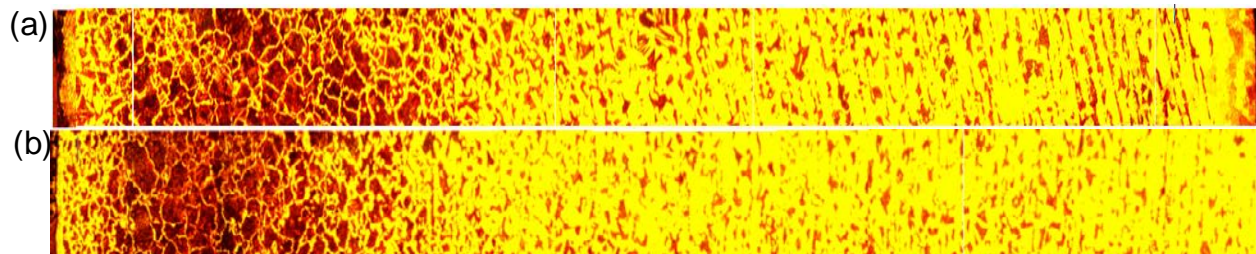


Fig. 3.12. Cambio microestructural de dos discos SAE 1020 cementado con carbón vegetal a 980 °C en un periodo de 8 h: a) Cambios microestructurales del disco cementado 1; y b) cambios microestructurales del disco cementado 2.

De la medición metalográfica mediante microscopio se obtuvo un valor promedio de espesor de capa de 1.45 mm.

3.3. DETERMINACIÓN DE DUREZA

Se realizaron 6 ensayos de dureza en dos de los discos cementados, posteriormente haciendo uso de un calibrador vernier y de documentación fotográfica de las proyecciones del microscopio (ver Fig. 3.13), se tomó medición de las distancias entre cada uno de los puntos medidos vectorialmente desde la superficie hacia el núcleo del

disco, dando como resultados caídas de dureza conforme nos acercamos al núcleo, estos cambios son congruentes con los resultados de cambios microestructurales obtenidos durante el estudio metalográfico, lo que revela el espesor de capa cementada.

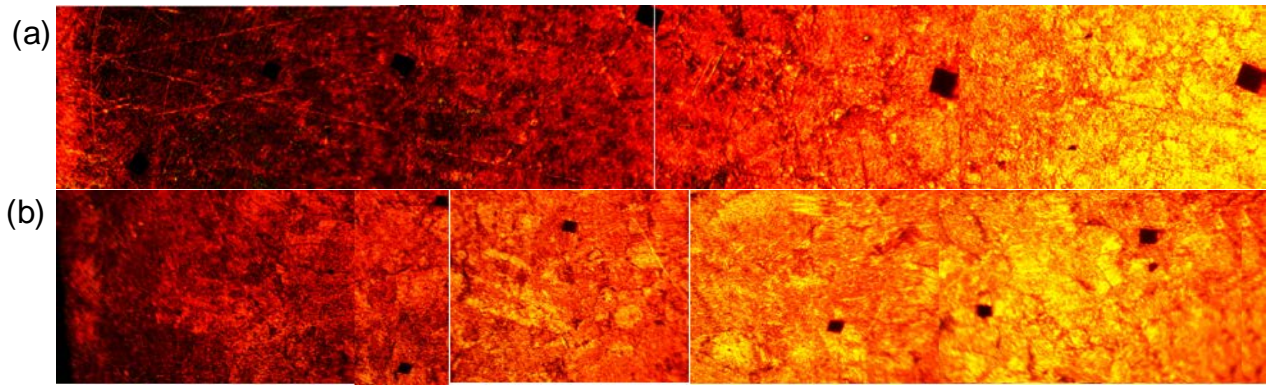


Fig. 3.13. Medición de dureza de discos cementados: a) distribución de ensayos en dureza realizados en primer disco; y b) distribución de ensayos de dureza realizados en segundo disco.

En la Tabla 3.5 se presenta los resultados obtenidos de dureza en los ensayos realizados en la sección transversal de los discos 1 y 2 y en la Fig. 3.14 se presenta la Ubicación de éstos.

Tabla 3.5. Valores de dureza Rockwell C obtenidos en discos de acero SAE 1020 con tratamiento termoquímico de cementación sólida, con postratamiento térmico de temple y revenido.

Disco	Nº de medición	Distancia, mm	HRC
1	1	0.42	54.7
	2	0.69	54.2
	3	0.97	48.3
	4	1.31	44.4
	5	1.42	44.0
	6	2.27	23.2
2	1	0.95	45.7
	2	1.14	43.7
	3	1.28	42.3
	4	1.68	34.5
	5	1.81	32.4
	6	2.06	20.7

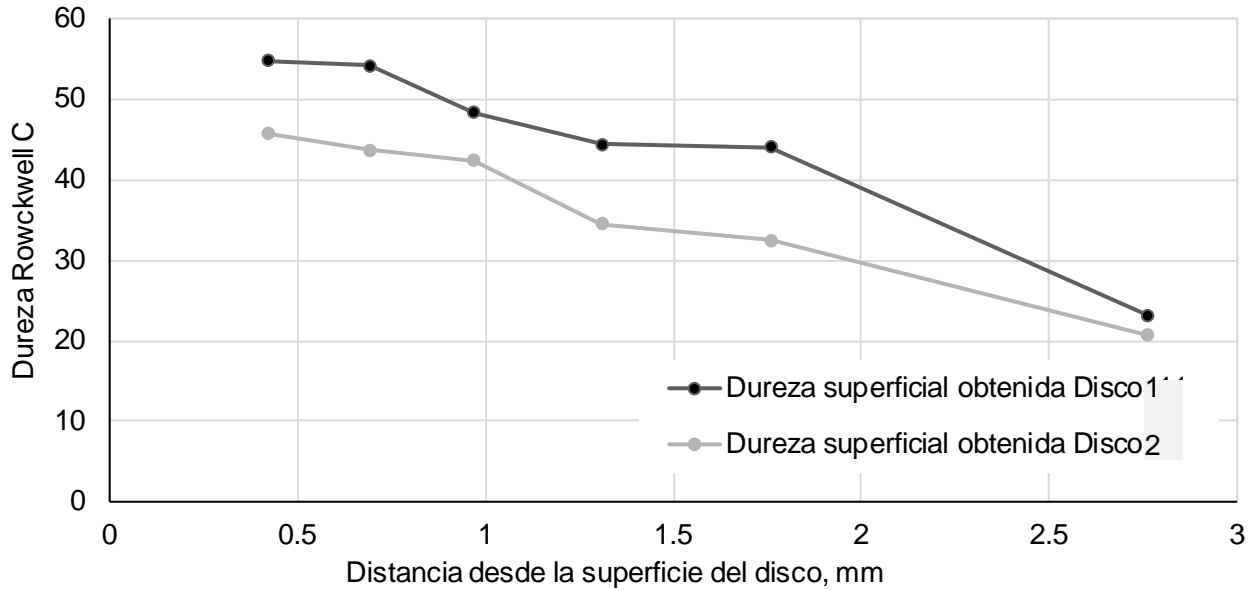


Fig. 3.14. Dureza Rowckwell C en función de la distancia desde la superficie de los discos 1 y 2.

3.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se identificó una mayor pérdida de masa en los discos con una superficie con tratamiento termoquímico de cementación sólida que en los recocidos, para cada una de las condiciones de carga 15, 20 y 25 N. Por otra parte, mismo fenómeno se repitió en las espigas, siendo las sometidas a desgaste con discos cementados las que presentaron una pérdida de masa mucho más elevada que las ensayadas con los discos en condición de recocido, lo que sugiere una modificación en el tipo de desgaste a abrasivo debido a las interacciones de partículas con un grado mayor de dureza.

Se identificó un aumento de la dureza superficial debido al tratamiento termoquímico de cementación con una respectiva caída de dureza a medida llega al núcleo de los discos, así hasta llegar a la dureza original del material en condición de recocido en su núcleo. Por lo que se considera un espesor efectivo de capa cementada equivalente a 1.35 mm.

CONCLUSIONES

Del análisis detallado de los resultados obtenidos tras la finalización de la fase experimental, a partir de la interpretación de los datos recopilados y su correspondiente evaluación, se pueden establecer hallazgos significativos que permiten comprender con mayor profundidad los efectos observados, por lo tanto, se concluye que:

- ✓ Las pérdidas de masa en los discos de acero SAE 1020 cementados con postratamiento térmico de temple y revenidos a 200 °C son mayores que en los discos sin cementar utilizando en ambos casos espigas de acero SAE O1 templadas y revenidas a 200 °C, debido a cambios en el mecanismo de desgaste en el disco, producto del aumento de carburos en la capa superficial los cuales se encuentran rodeados de una matriz martensítica producto del temple, esto aumenta la dureza superficial a tal punto que existe un desprendimiento de partículas mucho más duras y abrasivas que luego son arrastradas por la espiga modificando el desgaste al tipo abrasivo, versus un desgaste de naturaleza adhesiva que se presenta en los ensayos con discos recocidos.
- ✓ La variación en los coeficientes de fricción es mayor en los discos cementado que en los recocidos bajo una misma carga, al igual que se produce mayor desgaste en los discos cementado que en los recocidos, lo cual es otra variable que confirma el hecho de una modifica el mecanismo de desgaste.
- ✓ El coeficiente de fricción aumenta en los primeros 200 m de deslizamiento, lo cual ocurre por la estabilización o acoplamiento, en donde la espiga define su trayectoria continúa generando una pista que se inicia por una rayadura.
- ✓ El incremento de dureza obtenida en el interior de la subsuperficie de los discos de acero SAE 1020 cementación con postratamiento térmico de temple u revenido a 200 °C con respecto al metal base, confirmar la efectividad del postratamiento térmico y permite estimar el espesor de capa cementada de ~1.35 mm como resultado del cambio de 54 HRC.

- ✓ El espesor de la capa cementada obtenido tanto por análisis metalográfico como también por dureza son similares; así, a través del estudio metalográfico de los discos cementados se demostró el cambio en la microestructura del material, encontrando que presenta un espesor de capa cementada de ~1.38 mm, el cual corresponde a aproximadamente 15% de ferrita y 85% de perlita.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Falasca, G. (2009). Manual técnico de la pastilla de freno.
- [2] Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana San Nicolas de Hidalgo (2017). "Tribología y Desgaste de los materiales".
- [3] Reyes Cruz, J. (2015). Presión de saturación del licor amoniacal y su relación con el fenómeno de cavitación en bombas centrífugas. Minería y Geología.
- [4] Sarkar, A.D. (1990). Desgaste de Metales. México D.F.; México: Limusa.
- [5] Gobind, Dr. NeelKanth G. Jwala P. (2015), IOSRJOURNAL, Techniques of Measuring Wear for Bulk Materials and Advanced Surface Coatings <https://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/vol12-issue2/Version-6/P01226101106.pdf>
- [6] Avner, S.H. (1995). Introducción a la metalurgia física (2.^a Ed.).
- [7] García Ramírez. G.R. (2017). Estudio de desgaste tipo espiga sobre disco, utilizando un AISI 1020 cementado y un acero O1. Universidad de el salvador. <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/15155/>
- [8] Lastin, Y., y Arzamásov, B. (1987). Tratamiento Quimicotérmico de los Metales (1.^a Ed.). Editorial Mir Moscú.
- [9] International ASTM, A. (s.f.). Norma G 99-04.
- [10] Estévez Ayala, J.D., Linares Linares J.A, y Revelo Pozo L.A. (2025). Estudio de desgaste en un acero SAE 3115 sin y con cementación utilizando carbón vegetal de bálsamo templado y revenido. Universidad de El Salvador. <https://repositorio.ues.edu.sv/items/35ae6972-7cea-41b2-8e0b-80667ee337cf>
- [11] Escobar Mejía, R.E., Navarro Pérez, M.E, y Romero Martínez, R.M. (2025). Estudio de desgaste en un acero SAE 3115 sin y con cementación utilizando carbón vegetal de café. Universidad de El Salvador.